

Національний технічний університет України
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені Ігоря Сікорського»
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра технології машинобудування

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ Юрій ПЕТРАКОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

“ _____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Технології машинобудування»
зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»

на тему: Дослідження замкненої системи автоматичного управління
фрезерним верстатом з ЧПК

Виконав:

студент 6 курсу, групи МТ-91мп

Ковалевський Ігор В'ячеславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник: Кореньков Володимир Миколайович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 року
(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Використання і створення інтелектуальних систем управління, що враховують саме технічні характеристики, стан даного верстата, ріжучого інструменту, також заготовки та вимірювальної системи – це один із перспективних шляхів підвищення якості обробки на верстатах з ЧПК. Наразі доволі актуальною темою є розробка теоретичних та експериментальних досліджень, що дозволяють побудувати деяку формальну математичну модель, на основі якої будуть цілком можливі маніпуляції в програмі, а саме корекція виконавчих рухів металорізального обладнання (фрези), а саме руху подачі, в режимі реального часу.

Мета і завдання. Наведення ново-створеної системи адаптивного управління подачею в реальному часі в залежності від зміни припуску.

Об'єкт дослідження – технологічна оброблювана система.

Предмет дослідження – процес фрезерування.

Наукова новизна. Наведено метод поділу всіх довжин та траєкторій на кадри. Описаний метод управління подачею шляхом зчитування даних з комірок верстату та її перезапису для управління подачею в реальному часі. Встановлено чіткі обмеження по довжині кадру для управління подачею.

Практичне значення.

1. Розроблено програмний код для поділу довжин всіх траєкторій та відрізів на кадри.
2. Розроблено математичну залежність подачі від зміни потужності на шпинделі верстату.

Апробація результатів магістерської. Результати роботи представлялися с строки проведення: 18-25.11.2020»

Публікації. По темі роботи опубліковано статтю: Ковалевський І.В., Кореньков В.М, «Автоматичне управління подачею в реальному часі на фрезерних верстатах з ЧПК» / Матеріали на XVI Международной научно-практической конференции «Наука и образование без границ – 2020» Sp. z o.o. “Nauka I studia”,(Przemysl , Польша)

Структура та об’єм роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків. Робота викладена на 79 сторінках машинописного тексту, містить 29 рисунків, 1 додаток та 38 найменувань використаних літературних джерел. Загальний об’єм роботи складає 81 сторінок.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, чітко сформульовано мету магістерської роботи та завдання, представлено нові наукові результати, наведено їх практичну значимість в машинобудуванні.

У **першому розділі** проведено аналіз існуючих методів побудови математичних моделей динамічних систем для процесу різання, розглянуто замкнені системи управління та їх види. Проведено аналіз ринку.

У **другому розділі** поставлено чітку задачу та проведено теоретичне дослідження. Наведено концепцію роботи при поділі траєкторій та сформовано математичну модель для вирішення поставленої проблеми.

Третій розділ присвячено практичному дослідженню сформованої математичної моделі та визначення її обмежень для подальшого впровадження на виробництві.

Четвертий розділ Стартап проект.

РЕФЕРАТ

Актуальность темы. Использование и создание интеллектуальных систем управления, учитывающие именно технические характеристики, состояние данного станка, режущего инструмента, а также заготовки и измерительной системы - это один из перспективных путей повышения качества обработки на станках с ЧПУ. Сейчас довольно актуальной темой является разработка теоретических и экспериментальных исследований, позволяющих построить некоторую формальную математическую модель, на основе которой будут вполне возможны манипуляции в программе, а именно коррекция исполнительных движений металлорежущего оборудования (фрезы), а именно движения подачи, в режиме реального времени.

Цель и задачи. Наведение ново-созданной системы адаптивного управления подачей в реальном времени в зависимости от изменения припуска.

Объект исследования. Технологическая обрабатываемая система.

Предмет исследования - процесс фрезерования.

Научная новизна. Приведен метод разделения всех длин и траекторий на кадры. Описанный метод управления подачей путем считывания данных из ячеек станка и ее перезаписи для управления подачей в реальном времени. Установлены четкие ограничения по длине кадра для управления подачей

Практическое значение.

1. Разработан программный код для разделения длин всех траекторий и отрезков на кадры.
2. Разработана математическая зависимость подачи от изменения мощности на шпинделе станка.

Апробация результатов магистерской. Результаты работы представлялись на XVI Международной научно-практической конференции «Наука и образование без границ - 2020» сроки проведения: 18-25.11.2020»

Публикации. По теме работы опубликовано статью: Ковалевський І.В., Кореньков В.М, «Автоматичне управління подачею в реальному часі на фрезерних верстатах з ЧПК» / Матеріали на XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Наука і освіта без меж – 2020» Sp. z o.o. “Nauka I studia”,(Przemysl , Польша)

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 79 страницах машинописного текста, содержит 29 рисунков, 1 приложение и 38 наименований использованных литературных источников. Общий объем работы составляет 81 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы четкие цели магистерской работы и задачи, представлены новые научные результаты, приведены их практическую значимость в машиностроении.

В **первой главе** проведен анализ существующих методов построения математических моделей динамических систем для процесса резания, рассмотрены замкнутые системы управления и их виды. Проведен анализ рынка.

Во **втором разделе** поставлена задача и проведено теоретическое исследование. Приведены концепции работы при разделении траекторий и сформирована математическая модель для решения поставленной проблемы.

Третий раздел посвящен практическому исследованию сложившейся математической модели и определения ее ограничений для дальнейшего внедрения на производстве.

Четвертый раздел Стартап проект.

ABSTRACT

Actuality of theme. The use and creation of intelligent control systems that take into account precisely the technical characteristics, the state of the machine, the cutting tool, as well as the workpiece and the measuring system, is one of the promising ways to improve the quality of processing on CNC machines. Now a rather relevant topic is the development of theoretical and experimental studies that allow building some formal mathematical model, on the basis of which manipulations in the program will be quite possible, namely, the correction of the executive movements of the metal-cutting equipment (cutter), namely the feed movement, in real time.

Purpose and tasks. Guidance of the newly created adaptive feed control system in real time, depending on the change in stock.

Object of study. Technologically processed system.

The subject of the study is the milling process.

Scientific novelty. The method has been introduced for all dozens and trajectories on frames. The descriptions of the method of controlling the feed by way of reading the data from the commander verstat and rewriting for the control of the feed in real time. Installed readiness for additional frame for control of feed.

Practical meaning.

1. Developed software code for dividing the lengths of all trajectories and sections into frames.
2. The mathematical dependence of giving on change of power on a machine spindle is developed.

Testing the results of the master's degree. The results of the work were presented at the XVI International Scientific and Practical Conference " Science and Education without Borders - 2020 "; dates: 18-25.11.2020"

Publications. On the topic of the work, an article was published: Ковалевський І.В., Кореньков В.М, «Автоматичне управління подачею в реальному часі на фрезерних верстатах з ЧПК» / Матеріали на XVI Международной научно-практической конференции «Наука и образование без границ – 2020» Sp. z o.o. “Nauka I studia”,(Przemysl , Польша)

Structure and scope of work. The dissertation consists of an introduction, three sections, conclusions, a list of sources used and applications. The work is spread over 79 pages of typewritten text, contains 38 drawings, 1 appendix and 38 titles of used literature sources. The total volume of work is 81 pages.

CONTENTS OF THE WORK

In the introduction, the relevance of the work is substantiated, the goals of the master's work and tasks are formulated, new scientific results are presented, and their practical significance in mechanical engineering is given.

The **first chapter** analyzes the existing methods for constructing mathematical models of dynamic systems for the cutting process, considers closed control systems and their types. Market analysis is carried out.

In the **second section**, a task is posed and a theoretical study is carried out. Concepts of work for the separation of trajectories are given and a mathematical model is formed to solve the problem.

The **third section** is devoted to the practical study of the existing mathematical model and the definition of its limitations for further implementation in production.

Fourth section Startup project.

ЗМІСТ

Вступ	10
1 ОГЛЯД ЗАМКНЕНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЦИХ СИСТЕМ	
1.1	Методи моделювання технологічних систем 12
1.2	Ознайомлення з замкненими динамічними системами управління 13
1.2.1	Загальні відомості про системи управління 13
1.2.2	Типова схема управління 15
1.2.3	Замкнена система автоматичного управління 16
1.3	Типи систем та схем адаптивного управління 18
1.4	Всесвітньо відомі системи адаптивного управління 23
1.4.1	Omatic System, як програмний засіб для ЧПК 23
1.4.2	Адаптивне управління подачею від SORALUCE ADAPTIVE CONTROL 25
1.4.3	Siemens ACM 27
1.5	Автоматизовані системи управління режимами різання в реальному часі 28
1.5.1	Система VCM (моніторинг управління) – від Omatic 28
1.5.2	Система Toolinspect II MCU 29
1.6	Концепція роботи 31
1.7	Висновки 33
2 РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ ПОДАЧЕЮ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ НА ФРЕЗЕРНОМУ ВЕРСТАТІ З ЧПК	
2.1	Опис головної ідеї 34
2.2	Метод управління процесом фрезерування та представлення схеми САУ 42
2.2.1	Структурна схема 43
2.2.2	Головна ідея поділу кадру на маленькі частини 45
2.3	Математична модель 50
2.4	Висновки 52
3 ВИЗНАЧЕННЯ ОБМЕЖЕНЬ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ПОДАЧЕЮ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД МІНІМАЛЬНОЇ ДОВЖИНИ КАДРУ	
3.1	Реалізація обмежень, для управління подачею 53
3.2	Висновки 63

4 СТАРТАП

4.1	Опис головної ідеї	64
4.2	Аудит головної ідеї	66
4.3	Проведення аналізу перед запуском стартапу на сучасному ринці	67
4.4	Ризикова стратегія розвитку	71
4.5	Маркетингова програма стартапу	72
4.6	Висновки	73
	 Перелік посилань	 74
	 Додатки	 77

ВСТУП

Математичне моделювання (створення структурної схеми та розрахунок математичної моделі) динамічного зв'язку, що формується процесом різання, а також динамічної підсистеми станка, яка оброблює зі сторони різального інструменту та заготовки є предметом великої кількості досліджень. З чим це пов'язано? Через те, що утворений процесом різання динамічний зв'язок в основному визначає стійкість траєкторій формотворчих рухів інструменту відносно заготовки, що у свою чергу має вплив на траєкторії переміщення виконавчих елементів станка в траєкторії формоутворення.

Також в даній роботі буде розглядати математичний взаємозв'язок між масово-інерційними характеристиками та характеристиками приводу верстата.

З огляду літературних джерел відомо, що сучасні фірми з ЧПК вже доволі давно користуються поняттям адаптивного управління на своїх верстатах, що допомагає їм значно економити час обробки, та призмешуватти зношеність інструмента.

Але головним недоліком та не дослідженою частиною таких систем є саме управління процесами різання в реальному часі в межах одного кадру верстата з ЧПК.

Один з вагоміших методів управління процесом різання – це звісно зміна параметрів режиму різання (подачі S , глибини різання h , частоти обертання $Soб$).

Опираючись на дані багатьох досліджень та аналізуючи практику в машинобудівних виробництвах, можна зробити висновок, що похибки оброблення, які будуть виникають в наслідок пружних деформацій ТС - це основна складова загальної похибки при обробленні.

Тому враховуючи всі вище вказані фактори важливим фактором для

сучасного машинобудування є саме завдання розробки концепції компенсуючих пристроїв, за допомогою яких, в реальному часі під час протікання процесу різання дозволить керувати режимами різання таким чином, щоб максимально продуктивно використовувати динамічні параметри технологічної системи.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЗАМКНЕНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЦИХ СИСТЕМ

1.1 Методи моделювання технологічних систем

В сучасному світі при моделюванні та дослідженні технічних систем, на допомогу приходять різні методи моделювання.

Як відомо існують два розділи математики – прикладна та класична, які всеціло залежать від характеру математичного апарату який використовується.

Дані методи дослідження в математиці, що включають в собі мат. аналіз і теорію ймовірності, як правило не завжди присутні в наукових дослідженнях та виступають в них в основній ролі. Також вони використовуються для розв'язання проектних задач під час осмислення і створення технічних систем.

Інженери, що на практиці використовують та працюють з методами прикладної математики знають, що їх номенклатура значно ширше і частіше використовується. Ті практичні методи, які до неї входять нестандартні за вмістом простих та звичайних розрахунків, а саме: методами їхньої реалізації та прийомами, які в ній використовуються тощо.

Найпоширеніше відбувається так, що правильний вибір методу математичного моделювання, багато в чому залежить саме від ступеня деталізації системи і закону буття елементів об'єкта і зовнішньої дії. Можна виокремити три основних рівні математичного моделювання:

1) використання спеціальних мов при моделюванні, використання моделей, теорії множин, графів, граматик, моделювання систем за структурою, алгоритмів, моделювання статистики;

2) логічне моделювання функціональних систем так, що їхні моделі зображують у вигляді логічних рівнянь та з них будують використовуючи двох чи багатозначну логіку математики;

3) звичайно кількісне моделювання – це аналіз принципів схем елементів складальних систем. Моделі кількісного моделювання показують у вигляді системи нелінійних рівнянь (алгебраїчних або рідше інтегродиференціальних) і вивчають, використовуючи метод функціонального аналізу, або теорії диференціальних рівнянь.

Група моделей – це саме систему ієрархії, яка показує взаємний зв'язок між різними аспектами опису об'єктів (на структурному, кількісному й логічному рівнях моделювання).

1.2 Ознайомлення з замкненими динамічними системами управління

1.2.1 Загальні відомості про системи управління

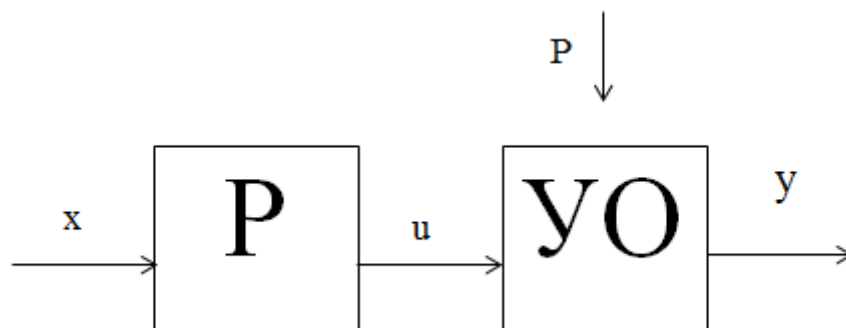


Рис. 1.1. – Загальна схема управління

(P) – регулятор, під дією сигналу x , що виробляє вплив u , який змінює стан УО в бажаному напрямку за вихідною величиною або ціллю управління y .

Під час функціонування САУ на УО діють різні зовнішні сигнали – збурення, які заважають досягти цілі управління.

Під об'єктом, що управляється розуміють механізм, вузол бо процес, на які впливають для досягнення мети управління. Будь-яка фізична система

вважається такою, що управляється, коли можна змінити величину входу, діючи на вихід.



Рис. 1.2. – Види управління

Як вже відомо управління може відбуватися за помилкою, або за збуренням.

Управління за збуренням здійснюється розімкненими системами і точність управління цілком залежить від адекватності мат моделі. Такі системи не мають зворотнього зв'язку і не втрачають стійкості (не схильні до коливань)

Замкнена система управляється за помилкою. Є більш складною, схильна до втрати сталості, але автоматично компенсує всі похибки, що викликані збуренням, які діють на елементи системи оснащені зворотнім зв'язком.

В даній магістерській дисертації будемо розглядати лише замкнені системи, функціональні схеми, їхнє управління, а також мат моделі в системі ЧПК.

1.2.2 Типова схема управління

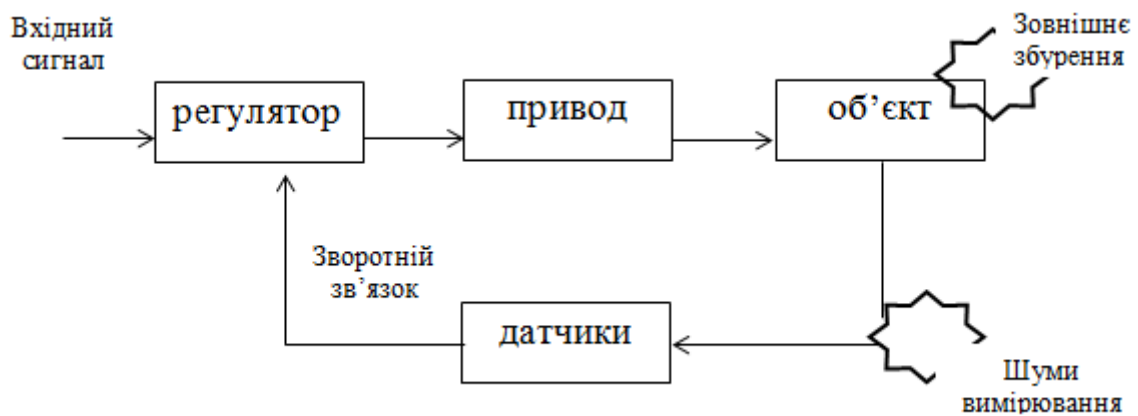


Рис. 1.3. – Типова структурна схема управління

Як відомо з курсу ТАУ [34]: взаємопов'язані елементи – це вже система, яка володіє (за рахунок зв'язків) особливими властивостями, яких немає у окремих елементах і будь-якій їх комбінації. Особлива інтрига управління пов'язана з тим, що на об'єкт діє навколишнє середовище – зовнішні сили збурення, які «заважають регулятору» виконувати поставлене завдання. Більшість збурень заздалегідь непередбачувані, тобто носять випадковий характер.

Крім того, датчики вимірюють параметри не точно, аз деякою помилкою, нехай і малою. В цьому випадку говорять про «шуми вимірювання», за аналогією з шумами в радіотехніці, які спотворюють сигнали [33].

Кажуть, що в системі є зворотній зв'язок, тобто регулятор використовує інформацію про стан об'єкта для вироблення управління. Системи зі зворотнім зв'язком називають замкнутими, оскільки інформація передається по замкнутому контуру.

Регулятор порівнює вхідний сигнал з сигналами зворотнього зв'язку через датчики та визначає неузгоджену помилку управління – різницю між заданим та фактичним станом. Якщо вона дорівнює нулю, ніякого управління

не потрібно. Якщо різниця є, регулятор видає керуючий сигнал, який прагне звести неузгодженість до нуля.

Чи можливо управляти об'єктом так, щоб не було помилки? В наш час в реальних системах – ні. Перш за все пов'язано з зовнішніми впливами та шумами, які заздалегідь невідомі. Крім того, об'єкти управління - інерційні, тобто, не можуть миттєво перейти з одного стану в інший. Можливості регулятора і приводів (тобто потужність сигналу управління) завжди обмежені, тому швидкодія системи управління (швидкість переходу на новий режим) також обмежена.

1.2.3 Замкнена система автоматичного управління

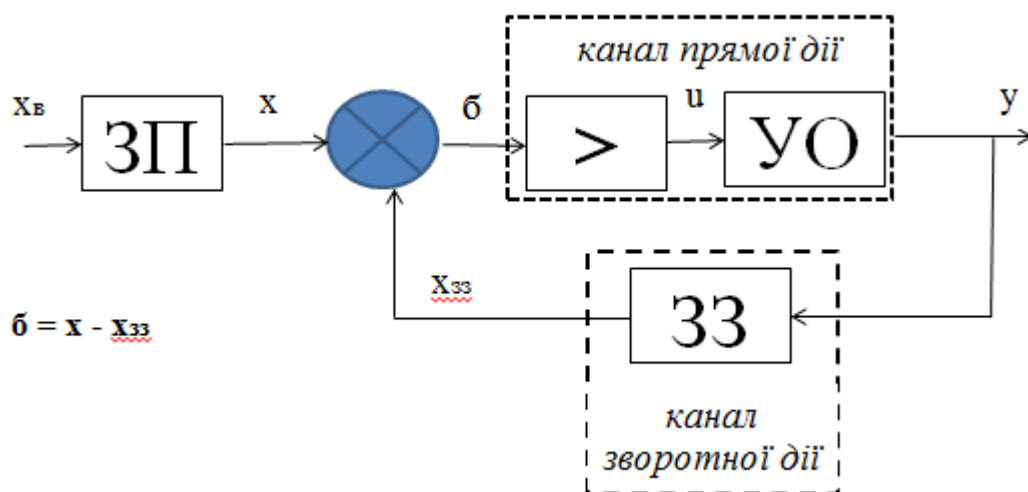


Рис. 1.4. – Замкнена система автоматичного управління

Принцип зворотнього зв'язку

При заданій функціональній схемі, помилка повинна наближатися до нуля, або залишатися в заданих межах.

Задавльний пристрій (ЗП) перетворює вхідний сигнал x_v у величину x , тої фізичної природи, що і величина $x_{зз}$. Звичайно величина x назив. вхідним сигналом САУ. Порівняльний пристрій – виробляє сигнал помилки, що безпосередньо прикладений до прямого сигналу [20]

Канал прямої дії – представляє систему, що управляється і виробляє управляючий вплив u (звичайно це підсилювач потужності з великим коеф. підсилення)

Об'єкт, що управляється (УО) – представлений з входом u і виходом y , що з ціллю управління (в САУ УО входить в канал прямої дії)

Канал зворотнього зв'язку складається з вимірної величини y та перетворює її в сигнал зворотнього зв'язку.

Частково або повністю програмувати цикл роботи верстата, режим обробки і зміну інструменту та задавати шляхом попередньо налагоджувати упорів величину переміщень її виконавчих органів можна за ЧПУ. Будучи аналоговою системою управління замкнутого типу, вона володіє високою гнучкістю, забезпечує легке зміна послідовності включення апаратів. Системи управління замкнутого типу здійснюють контроль виконавчого органу верстата по шляху (шляхові), часу (тимчасові), швидкості, потужності, тиску й іншим параметрам.

У замкнутих ЧПУ для зворотного зв'язку використовуються два потоки інформації. Один потік надходить від пристрою, що зчитує, а другий - від пристрою, що вимірює дійсні переміщення супортів, кареток або інших виконавчих органів верстата. У самоналагоджувальних системах інформація, яка надходить від пристрою, що зчитує коригується з урахування, що надходять з блоку пам'яті відомостей про результати обробки попередньої заготовки. За рахунок цього підвищується точність обробки, так як зміни умов роботи запам'ятовуються і узагальнюються в пристроях самонастроювання пам'яті верстата, а потім перетворюються в керуючий сигнал.

1.3 Типи систем та схем адаптивного управління

Протягом останніх двох десятиліть кількість комп'ютеризованих систем з цифровим управлінням (ЧПУ) надзвичайно зросла майже в усіх галузях виробництва. Загальним недоліком цих систем є те, що їх змінні управління обробкою, такі як швидкості або подачі, прописуються програмістом деталей і, отже, залежать від його досвіду та знань. Щоб запобігти появи ймовірності поломки інструменту, програміст повинен врахувати найбільш несприятливі умови (які нерідко трапляються на практиці) та обрати відповідні консервативні значення для обробних змінних [6].

Контролери зворотного зв'язку - це переважно простіші схеми, і вони стануть нестабільними у відповідь на зміни в динаміці процесу. В результаті чого, багато систем з ЧПК працюють неефективно. З цієї причини управління верстатами з ЧПК системи, забезпечує оперативне регулювання операційних параметрів. Ці системи класифікуються на три типи: геометрична адаптивна компенсація (GAC) система; система адаптивного управління оптимізацією (ACO); та система адаптивних обмежень управління (ACC). Системи GAC застосовують, щоб підвищити точність деталей, застосовуючи геометричну помилку в реальному часі: компенсація неточності, спричиненої різною машиною температура, неточна геометрія верстата, знос інструменту та інші фактори [7]. Однак через труднощі в режимі онлайн вимірювання зносу інструменту та температури верстата, в наш час немає доступних комерційних систем GAC [8].

Системи ACO та ACC підвищують продуктивність застосовуючи адаптивну техніку управління, яка варіюється від зчитування змінних в реальному часі [9]. Для поточного середовища різання призначення систем ACO вимагає онлайн вимірювання зносу інструменту.

Адаптивний контроль сам по собі не може контролювати сили різання ефективно. Немає контролера, який може відповісти досить швидко до різких

змін геометрії зрізу до усунути великі стрибки зусиль різання. Отже, в якості задачі стоїть, адаптивне управління процесом фрезерування у поєднанні з спеціально написаним програмним кодом.

Концепція полягає у реалізації управління в режимі on-line безпосередньо на фрезерному верстаті з ЧПК, стабілізуючи умови процесу фрезерування, змінюючи подачі в залежності від сигналів обурення, які будуть зчитуватися з датчиків приєднаних до верстату з ЧПК.

Наявність комп'ютера в управлінні системи і потреба в більш високій продуктивності значно прискорили розробку систем адаптивного управління (АС) для різання металу. Ці системи засновані на контролі параметрів різання в реальному часі з посиленням на вимірювання змінні стану процесу обробки. Адаптивне управління в основному система зворотного зв'язку, яка розглядає ЧПУ як внутрішню (рис. 1.10), при цьому параметри обробки автоматично адаптуються до фактичних умов процесу обробки.

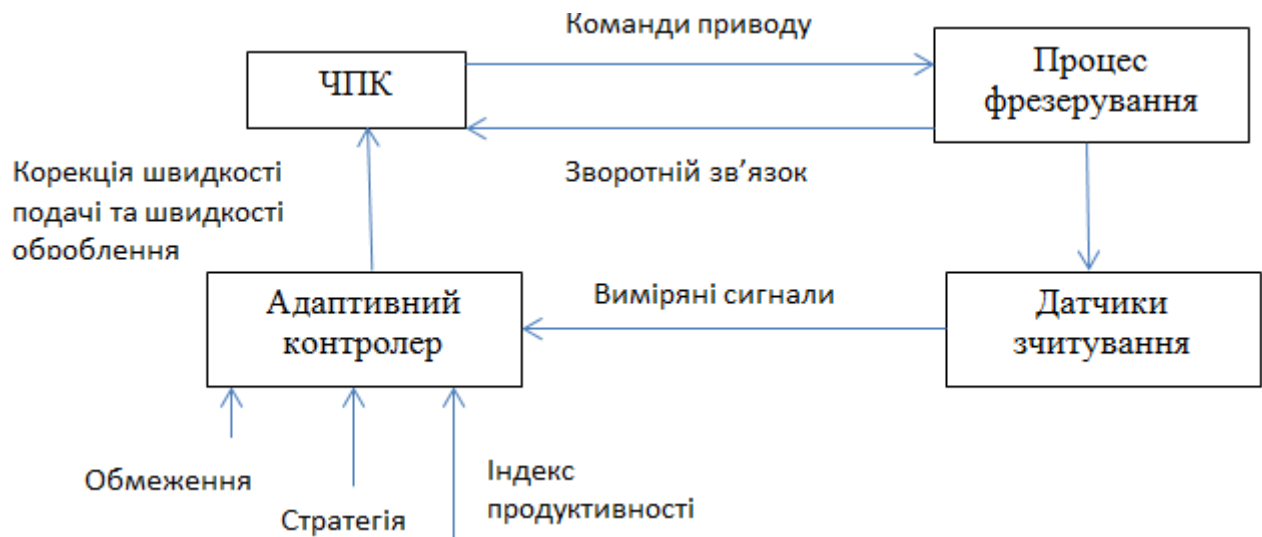


Рисунок 1.5 - Загальна адаптивна схема управління в верстаті з ЧПК

Але в наш час застосування знайшли лише пара систем адаптивного управління з ЧПК.

Отже, адаптивні системи управління ЧПК можна розділити на: граничне і

оптимальне управління.

Адаптивні обмежувальні системи управління забезпечують постійне значення певних параметрів процесу різання під впливом різних збурень (рис. 1.11). Таким чином, в умовах змінного припуску та твердості матеріалу заготовки (порушення) ця система управління стабілізує задане граничне значення параметра сили різання (наприклад, сили різання P , крутного моменту на шпинделі $M_{кр}$ або потужності різання N), отримуючи сигнал від вимірювального перетворювача, відповідний фактичному значенню цей параметр [13].

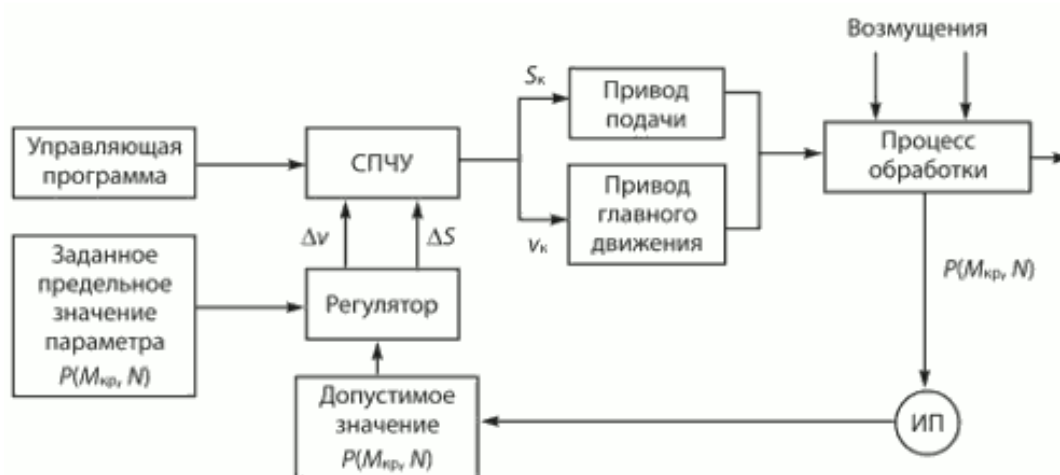


Рисунок 1.6 - Схема побудови адаптивної системи граничного управління

Це робиться шляхом відповідного збільшення або зменшення подачі S (на величину ΔS), швидкості різання v (на величину Δv), а в результаті чого отримують скориговані значення S_k і v_k , що подаються на приводи машин. Найбільш широко використовується адаптивне управління машинами обмежувального типу, в яких лише подача S є контрольованою змінною [13, ст. 1].

Граничні значення параметрів, що встановлюються цією системою при управлінні обробкою, визначаються на основі попереднього дослідження процесу обробки.

Адаптивні системи оптимального управління (рис. 1.12) при обробці заготовок автоматично шукають і підтримують такі комбінації швидкості різання V і подачі S , які, будуть забезпечувати максимальне значення цільової функції H обробки (точність, продуктивність або вартість обробки) при наявності технічних обмежень і впливів, що обурюють (коливання припуску, твердості матеріалу заготовки, зміни ріжучих властивостей інструменту і т. д.) (рис. 1.12) [13].



Рисунок 1.7 - Схема побудови адаптивної системи оптимального управління

Технічні обмеження - це максимальні і мінімальні значення параметрів, дозволених на цій машині: S_{max} , S_{min} , $n_{шп} (max)$, $n_{шп} (min)$, максимально допустима глибина різання, рівень вібрації тощо.

Основою побудови адаптивного управління оптимальними верстатами є **математична модель** керованого процесу обробки, аналітично визначає систему технічних обмежень області пошуку оптимальних режимів різання і виражає залежність критерію оптимізації від параметрів обробки [13].

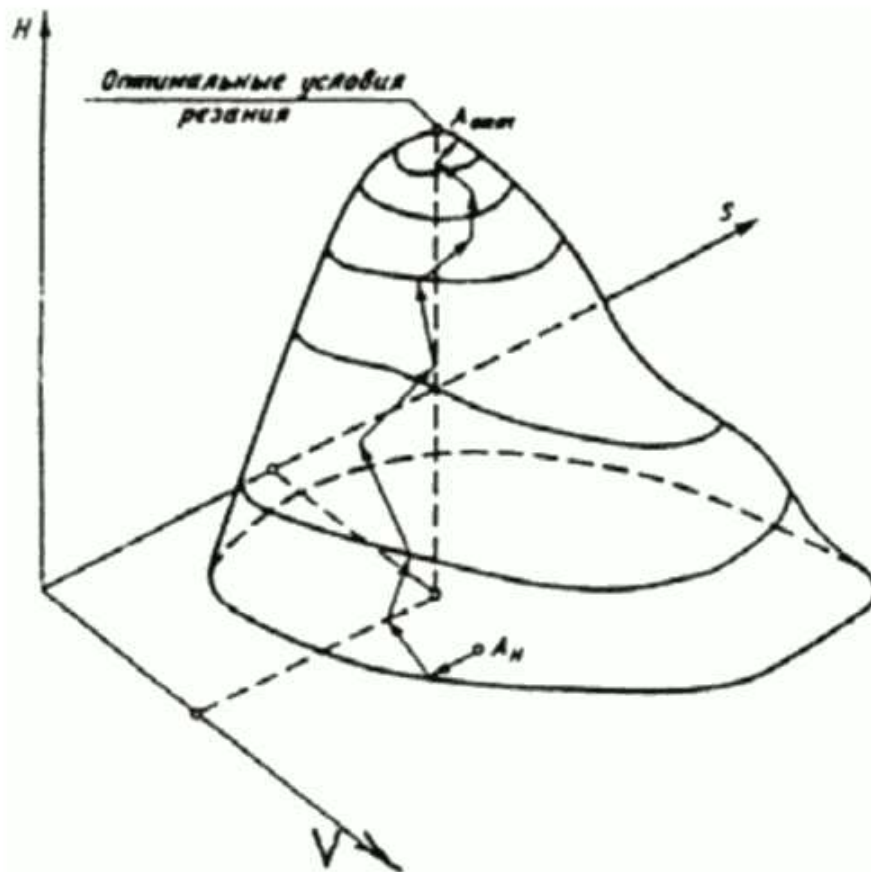


Рисунок 1.8 - Схема побудови адаптивної системи оптимального управління

Адаптивні системи управління особливо ефективно застосовуються на фрезерних верстатах при обробці складних деталей з торцевими фрезами малого діаметру, на токарних верстатах - при обробці деталей фрезами зі складною формою з поперечною подачею, на верстатах електроерозійних тощо. Однак широке впровадження адаптивних систем управління в металообробці стримується поки великою складністю і високою вартістю цих систем (особливо адаптивні системи оптимального управління), а також часто ще недостатня ефективність їх використання з кількох причин:

а) недостатніми знаннями математичних залежностей для розробки моделей керованих процесів різання, особливо при обробці нових матеріалів;

б) відсутністю в багатьох випадках необхідних вимірювальних засобів (вимірювальних перетворювачів необхідних розмірів, точності, надійності, швидкодії, завадостійкості та ін.);

в) непристосованістю конструкції багатьох металорізальних верстатів і їх окремих механізмів до найбільш раціонального розміщення цих перетворювачів на верстаті, недостатністю швидкодії окремих механізмів верстата і ін.

1.4 Всесвітньо відомі системи адаптивного управління

Ідея стабілізації процесу різання за допомогою замкнутих систем автоматичного управління (САУ) вже була реалізована вченими школи Б.С.Балакшін, ще в минулі 80-і роки минулого століття. Однак нерозвиненість елементарної бази, обчисл. техніки і верстатів з ЧПК не дозволили довести експериментальні зразки до промислового використання. Значні переваги таких САУ в стабілізації процесу різання залучали науковців і виробників і в наш час нарешті з'явилися надійні промислові зразки. [36, ст.13-27]

Фірма Omative System (США) пропонує систему, побудовану на використанні поточної інформації, реалізовану на сучасному рівні для верстатів з ЧПК, які вже випускаються провідними фірмами та обладнані різними датчиками. Саме ці датчики і використовуються фірмою в якості датчиків зворотного зв'язку для своїх САУ.

1.4.1 Omative System як програмний засіб для ЧПК

OMATIVE ACM вимірює навантаження на шпинделі обчислює оптимальну подачу для кожного ріжучого інструменту і матеріалу заготовки, і, по результатах цих розрахунків, автоматично управляє подачею в реальному часі. При меншому навантаженні на шпинделі подача збільшується, в той час як збільшення навантаження призводить до зменшення подачі.

В результаті істотно зменшується час обробки деталі, запобігає перевантаження шпинделя і інструменту - особливо при чорнової і напівчистої обробки.

Основна ідея, реалізована в САМ системі фірми полягає в тому, що відповідно до інформації, одержуваної від датчика в процесі обробки (наприклад по потужності двигуна головного руху верстата з ЧПК) автоматично змінюється (переписується) подача, величина якої була попередньо задана в керуючій програмі в G-кодах. [36]

За рахунок цього стабілізується процес різання і гарантується істотне підвищення продуктивності при різних видах обробки. З огляду на, що зазвичай подача вибирається технологом-программістом виходячи з найгіршого поєднання умов різання, середній рівень подачі при управлінні з стабілізацією потужності різання буде значно вище, а значить, збільшується продуктивність обробки. [36, ст.14-26]



Рисунок 1.9 – Інтеграція OMATIVE ACM в ЧПК

Причому, оскільки застосовується поточне управління безпосередньо через стійку ЧПУ і контролери приводів, фірма розробила різні версії, адаптовані до стійок верстатів провідних виробників: Siemens, Fanuc, Heidenhain.



Рисунок 1.10 – Апаратно/програмна інтеграція ACM для Sinumerik

1.4.2 Адаптивне управління подачею від SORALUCE ADAPTIVE CONTROL

Доволі ефективним буде використання автоматичного управління, якщо в процесі механічної обробки зіткнулися з тривалим циклом роботи, перевантаження шпинделя та короткий термін служби інструменту завдяки [4,ст.1]:

1. Знижена здатність різання;
2. Коливання розмірів або матеріалу;
3. Коливання глибини різання, зносу інструменту або твердості матеріалу;

Ефективність використання адаптивного управління вже довела фірма Soraluce. [4, ст.1]

SORALUCE ADAPTIVE CONTROL – програмний засіб, який дозволяє автоматично регулювати задані параметри різання залежно від реальної обробної ситуації. (Рис. 1.11)

Коли енергоспоживання шпинделя менше запрограмованого, машина може пришвидшити подачу, скорочуючи час обробки. На відміну від цього,

коли споживання енергії вище запрограмованого, машина автоматично уповільнює подачу, щоб захистити інструмент, заготовку та верстат. [4, ст.1]

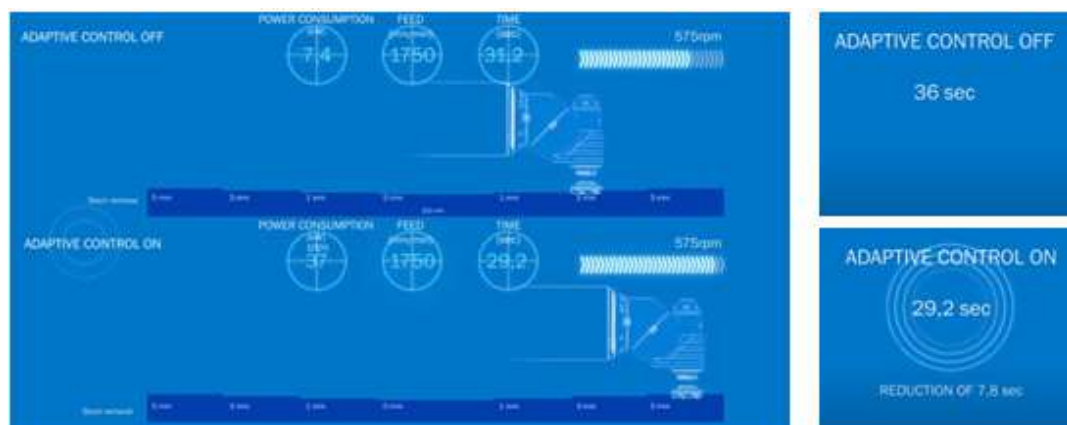


Рисунок 1.11 – SORALUCE ADAPTIVE CONTROL та його переваги

В процесі оброблення фрезерування даний програмний засіб: адаптує подачу різання верстата в залежності від змінних умов обробки, постійно порівнює потужність шпинделя з еталонною потужністю, яка визначається оператором. Потужність шпинделя залишається постійною, адаптуючи подачу різання верстата до умов різання. У разі збільшення товщини матеріалу швидкість подачі різання автоматично зменшується (30%). У разі зменшення товщини матеріалу подача різання автоматично збільшується (150%).

Переваги:

1. Оптимізує час циклу;
2. Дозволяє без нагляду обробку;
3. Збільшує термін служби верстата та інструменту;
4. Час обробки скорочується до 25%;
5. Зменшує загальне споживання енергії.

Цілком зрозуміло, що реалізація таких систем є know-how компаній і алгоритми управління не розкриваються, але ефективність адаптивного управління вже доведена не одноразово.

1.4.3 Siemens ACM

Адаптивне управління швидкістю подачі - ACM оптимізує запрограмовану швидкість подачі. Процес видалення запасу прискорюється, якщо існують оптимальні умови різання - і сповільнюється вниз, якщо геометрія заготовки, твердість матеріалу та / або умови інструменту вимагають цього.

Моніторинг - інструменти, шпинделі та деталі постійно працюють контролюється на предмет поломки, перевантаження, відсутності інструментів, повторюється механічна обробка на одній деталі та інші відхилення, що відбуваються в процесі механічної обробки. Як наслідок, ACM виявляє неоптимальні стани, які можуть призвести до пошкодження, отже, сприяння своєчасному втручанню.

Переваги:

1. До 30% зменшення часу на обробку;
2. До x2 рази термін служби інструменту;
3. Надійність системи та безпека у всіх робочих операціях;



Рисунок 1.12 – Siemens ACM

Підсумувавши аналіз ринку, можна дійти висновку, що ринкові загрози та реалізація проекту можуть перешкодити інтегруванню проекту в експлуатацію, що дозволить спланувати напрямки розвитку проекту, виходячи із потреб покупців та зовнішніх пропозицій від конкурентів.

1.5 Автоматизовані системи управління режимами різання в реальному часі

Провівши певні дослідження на сучасному машинобудівному ринці, ми дійшли наступних висновків, що OMATIVE ACM – не є єдиною системою для управління не тільки подачею а й іншими режимами різання.

1.5.1 Система VCM (Монітор контролю управління) - від Omative

Вже відома нам фірма Omative, представила програмний продукт OMATIVE (VCM).

Знос інструменту, поломка інструменту, знос і несправність підшипників шпинделя машини, погана обробка поверхні, низька якість виробу та навіть більш високе споживання енергії і звісно ж управління режимами різання – все на що здатна дана програма.

Система VCM - це двостороннє рішення, яке використовується для контролю стану верстатів та шпинделів, а також використовується для контролю за процесом обробки.

В обох випадках система завжди працює і надсилає сповіщення у випадках надмірної вібрації, а машина зупиняється, коли вібрація стає сильною.

Усі верстати можуть бути оснащені VCM у плавному та швидкому процесі встановлення. VCM складається з блоку збору даних, датчика вібрації та програмного забезпечення на базі Windows, інтегрованого в НМІ ЧПУ.

Кожен блок може підтримувати до трьох каналів.

Система спостереження VCM від Omative зображена на рисунку 1.13



Рисунок 1.13 – Система спостереження VCM від Omativ

1.5.2 Система Toolinspect II MCU

Модуль Toolinspect - це є вбудована комп'ютерна система, яка, інтегрується в систему польової шини (підключення). Є різні цифрові інтерфейси для підключення до польових шин.

Швидкість зчитування інформації в реальному часі доволі різна, при тому, що середнє значення 10-15 мс виправдало себе на практиці в цілому. Система сумісна з різними видами системних комп'ютерів ЧПК від BoschRexroth, Fanuc, Heidenhain або Siemens [37, ст. 20].

Дані приводу зчитуються з приводної шини й передаються та аналізуються по інтерфейсу Profi-bus в модуль головного контролю технологічних процесів і стану інструментів Toolinspect.

Переваги:

- алгоритм контролю управління з самооптимізаційною можливістю;
- управління за допомогою клавіш (просте управління кнопками);
- регулювання в процесі різання (адаптивне)
- мінімал. модифікації для програми з ЧПУ (потребується мінімальні зміни)

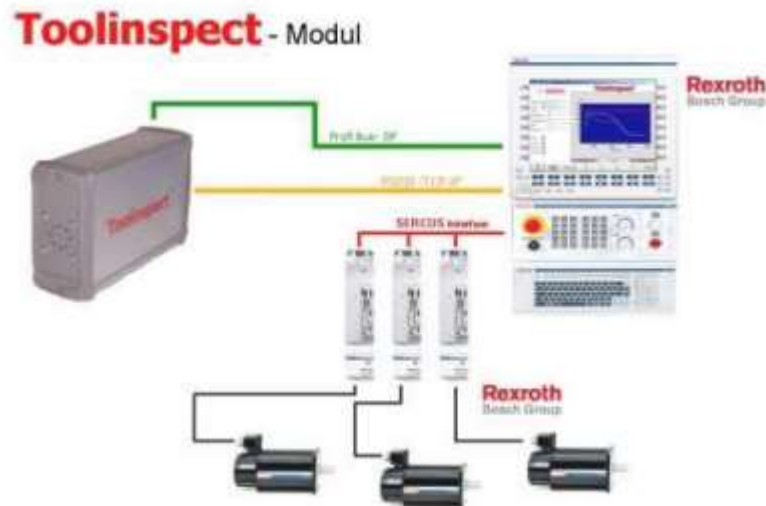


Рисунок 1.14 – Система спостереження Toolinspect II MCU

Нижче представлені зображення 2.15 та 2.16 на яких явно показано перевагу адаптивного управління подачею за рахунок сил збурення від сигналів зі шпинделя верстата відносно сталої подачі

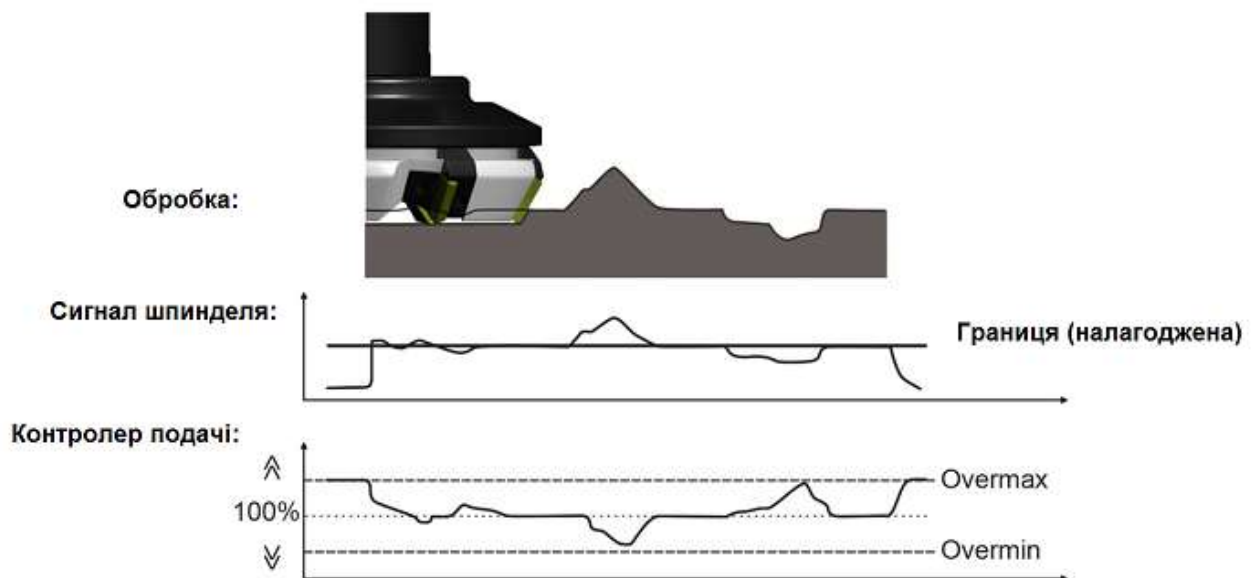


Рисунок 1.15 – Залежність подачі від сигналу шпинделя

Наявність запізнювання пояснюється кінцевою швидкістю поширення потоків інформації в об'єктах. Поряд з цим при зниженні порядку моделі

об'єкта вводять додаткове динамічне запізнювання. Для цього виділяють одну найбільшу постійну часу, а всі інші малі постійні часу замінюють ланкою динамічного запізнювання.

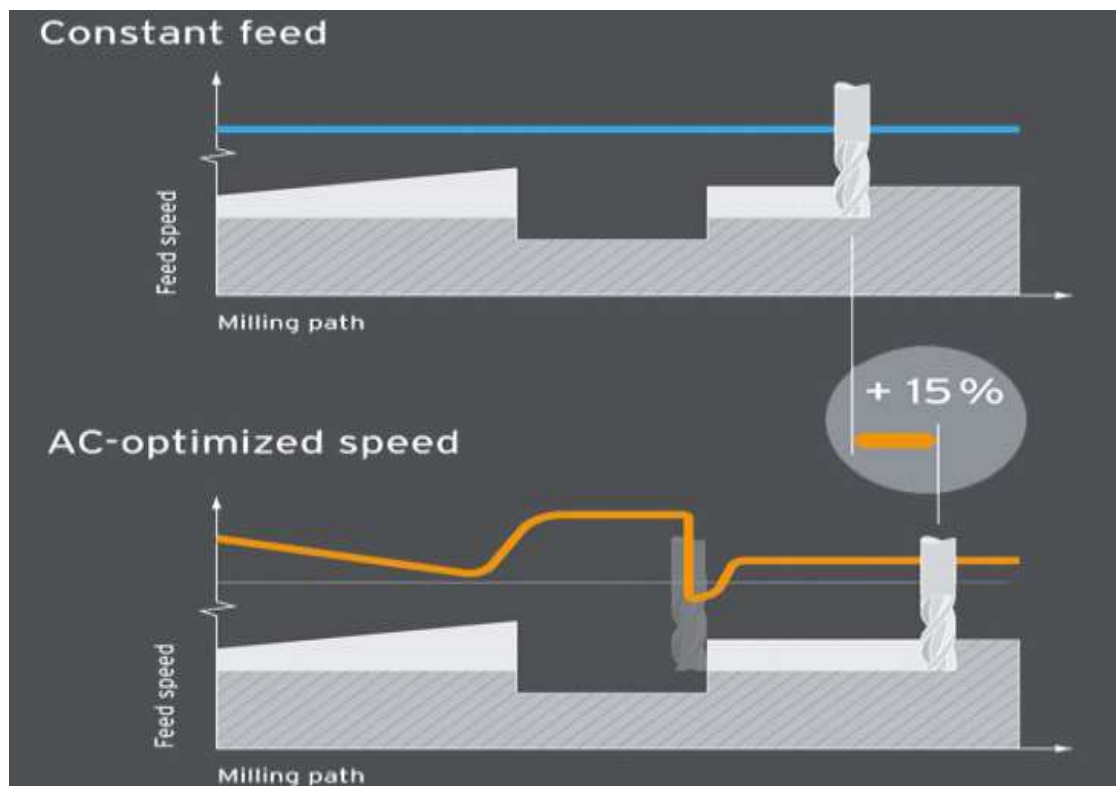


Рисунок 1.16 – Порівняння запрограмованої подачі та оптимізованої

1.6 Концепція роботи

За мету даної роботи стоїть управління управління режимами різання (подачею) в залежності від зміни припуску на нашому матеріалі.

Проаналізувавши зовнішній ринок, можемо дійти висновку, що вже існують як повні інтегційні системи для удуптивного управління (Siemens, Soraluce, Omative...) так і окремі системи котнролю (Toolinspect II MCU).

Але в чому їхні недоліки?

Жодна з цих систем не розглядає зміну подачі в реальному часі в залежності від зміну припуску.

Фактично на подачу в процесі різання ми також вплинути не можемо, в

процесі ходу фрези, ми не можемо впливати та змінювати подачу в границях кадру.

Відповідно впливає постановка завдання:

1. Яким чином досягається управління подачею в залежності від сил обурення, які спостерігаються в процесі різання. Іншими словами: як математично зміна припуску буде залежати від зміни подачі ?
2. Яким чином потрібно передавати сигнал на стійку верстата, щоб досягти управління подачею ?
3. Які існують обмеження при яких буде працювати система управління та від чого вони залежать?

1.7 Висновки

Враховуючи всі вище наведені дані та враховуючи сучасний аналіз ринку, можна дійти висновку, що питання управління режимами різання, особливо в реальному часі доволі гостро постає перед інженерами технологами. Адже дане управління дозволяє покращити продуктивність оброблення, якість та точність обробленої поверхні, зменшити зношування фрези або іншого інструмента всього лише змінивши подачу відповідно по зовнішніх сигналів обурення.

Дані засоби на ринку мають доволі вагому вартість і не простий спосіб реалізації, тому потребують логічного покращення. Тому питання управління процесом різання (а особливо подачею) за поточною інформацією є дуже актуальною.

Для досягнення даної мети потрібно зробити наступні кроки:

1. Створити математичну модель процесу фрезерування
2. Розробити метод, який дозволить управляти процесом різання за поточною інформацією.
3. Розробити керуючу програму, яка опрацьовує початковий G-код (який був запрограмований), у якому один кадр лінійного переміщення перетворюється на n-кадрів із певним заданим кроком.
4. Розробити апаратний засіб для зчитування сигналів обурення зі шпинделя верстата та управління даним процесом різання.

РОЗДІЛ 2 РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ ПОДАЧЕЮ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ НА ФРЕЗЕРНОМУ ВЕРСТАТІ З ЧПК

2.1 Опис головної ідеї

Всім відомо, як відбувається процес обробки на сучасних верстатах з ЧПК. Спочатку створюється 3D модель деталі, далі імітується процес обробки в САМ системах та отримуємо G-code, через зовнішній носій підключений до стійки верстата в процесі зчитування кадрів передається сигнал про початок обробки на верстатах з ЧПК. (рис 2.1)

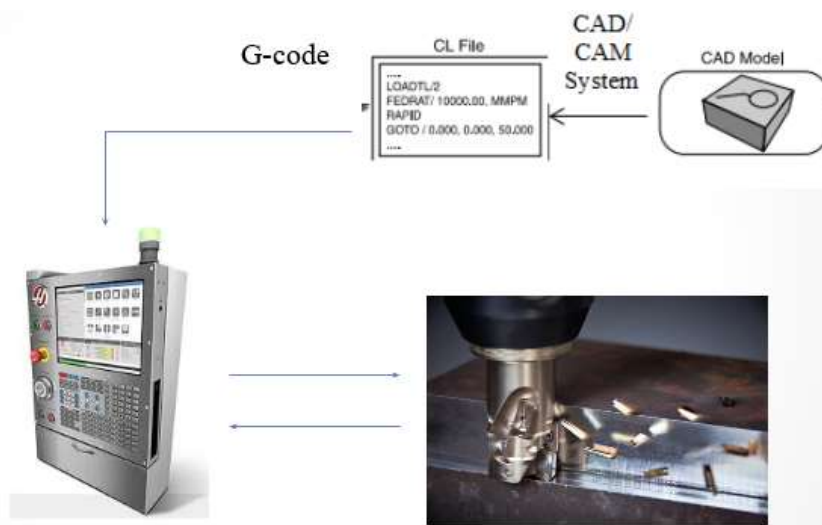


Рисунок 2.1 – Поетапна схема моделювання та оброблення

G-code складається з кадрів, майже завжди кадр це одна строка коду, кожна з яких позначає певну дію.

```
G00 X61.598 Y-5.046 S3000 M3
G43 Z1. H01 M8
Z-25. F300.
G01 G41 D01 X51.206 Y0.954
G03 X50.0 Y-3.546 R9.0
G01 Y-30.0
G02 X30.0 Y-50.0 R20.0
G01 X-30.0
G02 X-50.0 Y-30.0 R20.0
G01 Y25.0
```

Рисунок 2.2 – Структура G-code

Ідея наступна – якщо задати хід фрези в процесі різання, наприклад, на 1 метр, то припуск заготовки відповідно може змінюватися, відповідно будуть змінюватися упругі подачі, відтиск фрези та інші характеристики.

Відповідно постають запитання:

1. Як управляти подачею в залежності від зміни припуску?
2. Як дізнатися, що змінюється припуск деталі?

Ручне вимірювання припуску заготовки – не є автоматичним процесом управління, тому вимірювати зміну припуску заготовки в процесі ходу фрези – не є рішенням. Ширина зрізувально шару та інші характеристики ми також не зможемо контролювати.

Відповідю на це запитання може слугувати структура верстата з ЧПК. В сучасних верстатах шпинделі оснащені датчика, які зчитують певний сигнал під час процесу обробки та за рахунок оберненого зв'язку може контролювати певними параметрами.

Дана мета буда донесена в попередньому розділі про адаптивне управління.

Потрібно нагадати загальну схему управління:

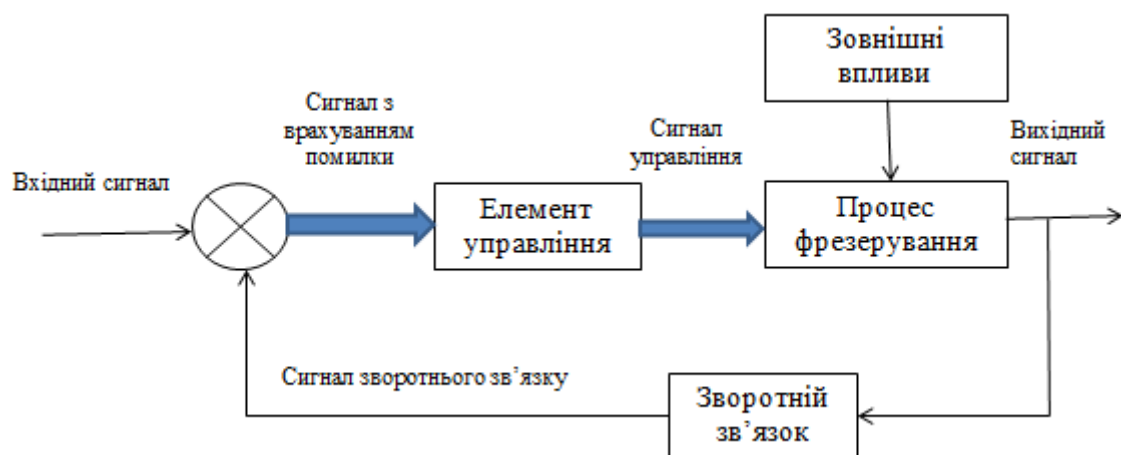


Рисунок 2.3 – Загальна схема управління

Нижче представлені компоненти загальної схеми управління:

Сигнал з врах. помилки – різниця сигналів між вхідним та сигналом зворотнього зв'язку.

Елемент управління - контролер, який надсилає керуючі сигнали на стійку верстата.

Сигнал управління – сигнал, який надсилається на стійку про зміну подачі.

Все що пов'язано з ЧПК – замкнений зв'язок з запізненням.

Отже, щоб управляти даною системою потрібно зчитувати певний сигнал та передати його на ПК для проведення відповідних висновків. Сигнали будуть зчитуватися з датчиків підключених до верстата, які вбудовані в шпиндель верстату.

Враховуючи всю вище наведену інформацію потрібно розуміти, що мета даного проекту – адаптивне управління подачею в процесі фрезерування в режимі реального часу виходячи із сигналів сил обурення. Інакше кажучи в процесі фрезерування коли шпиндель виконує кадр, фреза може відгинатися, що буде створювати певні навантаження на шпиндель верстату – саме ці сигнали нам потрібно одержати. Сигнали ми отримужмо з датчиків, які вже вбудовані в верстат.

В сучасних верстатх з ЧПК, як вже було сказано вище, в процесі обробки верстат вже вимірює відповідні параметри різання, які (на прикладі стійки HAAS) виведені на екран (рис 2.4)

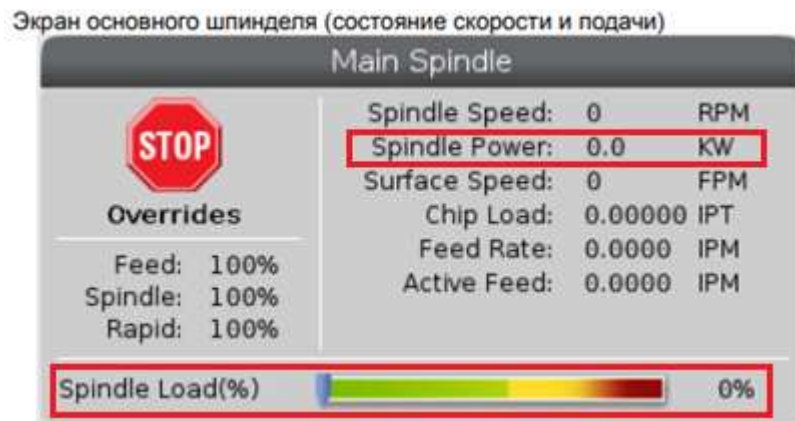


Рисунок 2.4 – Екран основного шпинделя на стійці HAAS

З рисунка видно, що на екрані основного шпинделя на стійці HAAS вже встановлені певні параметри різання, які в процесі обробки зчитуються автоматично.

Зрозуміло, що потужність на шпинделі (кВт) дорівнює навантаженню на шпинделі (%) (рис. 2.4), значення яких будуть автоматично виводитися на екран в процесі різання.

Зауваження! Фактично на стійку верстата програма не виводить фактичну потужність на шпинделі в залежності від заявленого моторі верстату. На кожному верстаті з ЧПК на стійку виводиться певне значення потужност в процесі різання, в залежності від установленого наладчиком верстату (в цілях безпеки).

Наша ціль – управління подачею в реальному часі. Фактично потрібно зв'язати подачу та навантаження на шпинделі.

З вище наведеної інформації отримуємо: величину зміни припуску «напрямую» вирахувати не вміємо, але ми визначили, що припуск змінюється по зміні потужності. Причому, що фактично ми будемо вимірювати не пряму величину в кВт, а те значення, яке наладчик задав в якості обмеження.

Яким чином ми зможемо отримати значення про зміну потужності?

MDC (machine data collection) – Ethernet Q commands. Збір даних машини (MDC) дозволяє використовувати команди Q та E для вилучення даних з

елемента керування через порт Ethernet або опцію бездротової мережі. Налаштування 143 одночасно включає цю функцію та визначає порт даних, який керуючий елемент використовує для зв'язку.

Елемент керування Haas використовує TCP-сервер для зв'язку через мережі. На віддаленому комп'ютері ви можете використовувати будь-яку програму терміналу, що підтримує TCP;

MDC – технологія ЧПК, яка реалізована тільки на HAAS верстатах з ЧПК. Дана технологія з'явилась приблизно 5 років тому і зараз наюрала великої популярності.

На яком принципі працюють верстати з ЧПК?

Сигнал з всіх датчиків, програмний код та багать інших елементів управління верстат записує в значенні пам'яті. Значенн пам'яті будується у вигляді простої таблиці (рис 2.5)

Command	Definition
?Q100	Machine Serial Number
?Q101	Control Software Version
?Q102	Machine Model Number
?Q104	Mode (LIST PROG, MDI, etc.)
?Q200	Tool Changes (total)

Рисунок 2.5 – Схематичне зображення значень пам'яті

Так чи інакше всі значення записуються в значення пам'яті, де зберігається певне значення.

Дана технологія дає чітке розуміння, що через поняття макрозмінної ми зможемо відкрити доступ до комірки цієї пам'яті (де зберігається певне значення).

Комірки пам'яті працюють в двох режимах: тільки для зчитування та ті, які можна перезаписати (т.б. нам дозволяється змінювати їх).

MDC технологія допомагає реалізувати наш процес управління. Чому? Тому, що та комірка, яка доступна для зчитування ми її використовуємо для того, щоб дізнатись чи змінилась у нас навантаження на шпинделі.

Потрібно взяти до уваги, що зчитування макрозмінних для перетворення подачі буде відбуватися тільки після підключення до стійки верстата з ЧПК (в нашому випадку HAAS).

Програмний код для підключення до стійки HAAS та зчитування/запису макрозмінних представлено в *Додаткі А*

```
import os, re, time, telnetlib

class parametr:

    def __init__(self, name, command):
        self.name = name          # custom name of macro variable
        self.command = command    # 4-digit macro variable number
        self.value = None         # result of measuring
        self.__pattern = re.compile('[*]?[0-9]*\.[*]?[0-9]*', re.IGNORECASE)

        # parsing of string & convert value to float number
        # for example: text=">>MACRO, -182.633216" ==> self.value=-182.633
    def set_value(self, text):
        self.value = round(float(self.__pattern.findall(text)[0]), 3)

# Network configuration
host = '172.21.16.35'
port = 3051
timeout = 5 # timeout in seconds
```

Рисунок 2.6 – Частина лістингу для підключення до стійки HAAS

Збір даних верстату дозволяє використовувати команди Q і E для отримання даних з системи управління через Ethernet-порт або бездротову мережу. Віддалений комп'ютер може також задавати певні макрозмінні.

Можна запросити значення будь-якої макрозмінної або системної змінної за допомогою команди Q600, наприклад Q600 xxx. При цьому на віддаленому комп'ютері буде вивидено зміст макрозмінної xxx. Правильний формат запиту -

?Q####, де #### - номер запиту, який закінчується новим рядком. Відповідь від системи управління починається з > і закінчується /r/n. Успішні запити вертають назву запиту, а потім запитувану інформацію, яка розділена комами.

У такий спосіб очевидним стає мета програмного продукту: у кожен кадр управляючої програми замість конкретного значення подачі F вставити макрозмінну, наприклад F# значення якої буде перезаписано з зовнішнього інтернет-підключення E-командою.

Отже, ми будемо користуватися коміркою, яка доступна для зчитування, щоб дізнатися: чи змінились у нас навантаження на шпинделі. І щоб на це впливати, нам потрібно комірки пам'яті перезаписувати, та вносити змну в ту комірку яка відповідає за подачу.

Перешкодою на шляху рішення є те, що подачу можливо змінити лише один раз в межах одного кадру! Стійка верстата, яка зчитала параметр подачі в G-code і буде її видавати. Але в процесі фрезерування припуск деталі може змінюватися

Оскільки кадр програми може задавати досить велике переміщення, під час якого можливі скачки сил різання, то очевидно що відпрацювати їх буде неможливо. Рішенням даної проблеми є використання свого роду постпроцесора – спеціально написаний програмний код, який опрацьовує початковий G-код, у якому один кадр лінійного переміщення перетворює на n-кадрів з певним кроком. Умовно це можна зобразити наступним лістингом (рис. 2.7):

```
G00 X0 Y0
G01 X0 Y100. F300.    =>  G00 X0 Y0
                           G01 X0 Y1. F#10
                           G01 X0 Y2. F#10
                           G01 X0 Y3. F#10
                           ...
                           G01 X0 Y100.
                           F#10
```

Рисунок 2.7 – Умовний лістинг для перетворення на n-кадрів з певним кроком

Створюючи спеціальну програму для перетворення кадра G-code на маленькі відрізки із певним шагом потрібно враховувати, що значення подачі, які буде видавати контролер згідно сигналів збурення, будуть братися із спеціальних комірок пам'яті на верстаті з ЧПК.

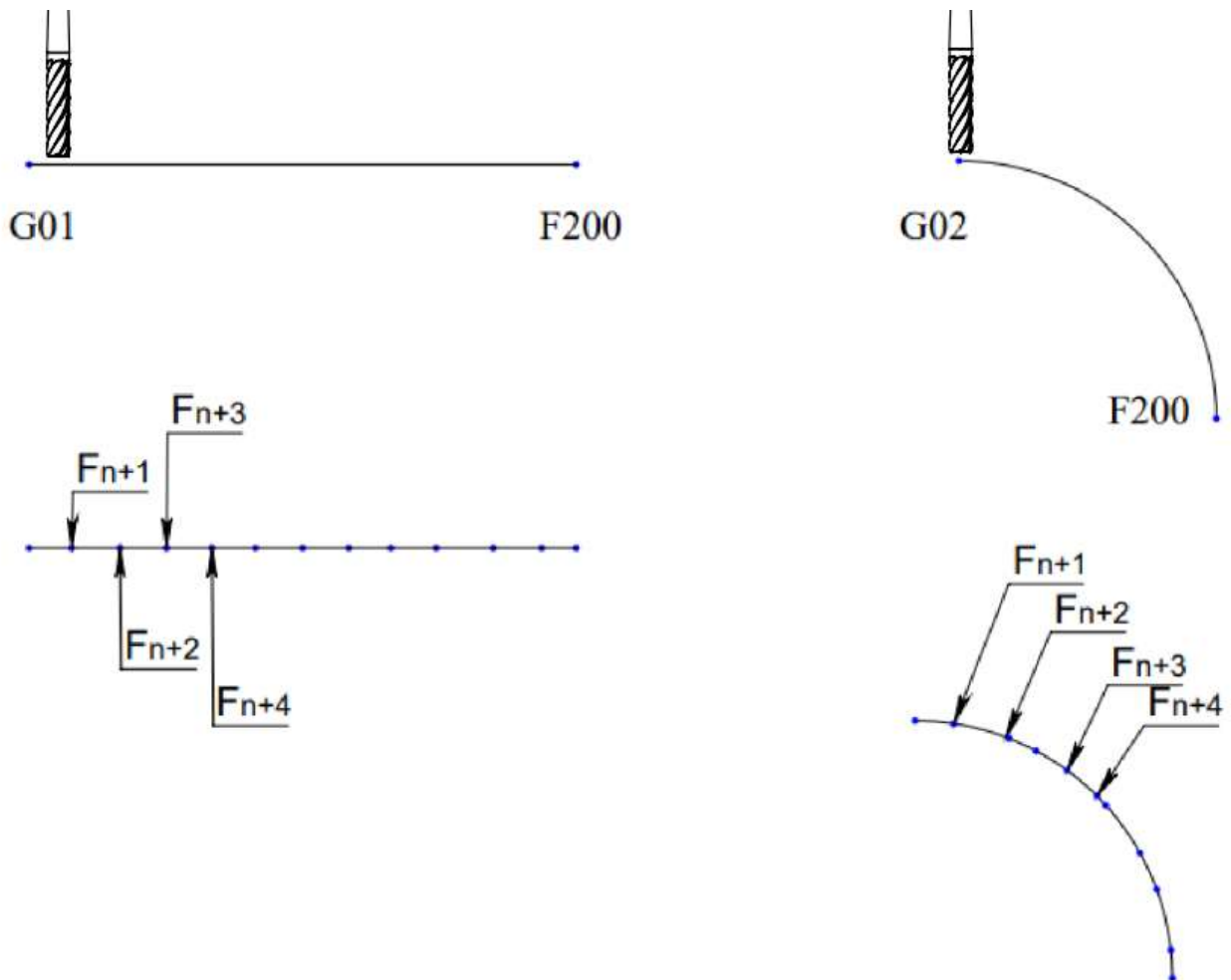


Рисунок 2.8 – Перетворення кадра подачі на n -відрізків з певним кроком для G01 та G02

Основна ідея даної роботи зводиться до того, щоб під час процесу фрезерування в режимі реального часу змінювати подачу F_{n+k} виходячи зі значень сигналів датчиків, які ми отримаємо підключивши їх до верстата.

Ми будемо отримувати сигнали зі шпинделя верстату враховуючи датчики, які вбудовані в верстат та зовнішнього підключення акселерометра

У процесі різання нам відомі лише миттєві значення P_x і P_y складових сили різання, що знімаються з динамометричних датчиків. Кінцевою метою є отримання обробленої поверхні з наперед заданими розмірами.

2.2 Метод управління процесом фрезерування та представлення схеми САУ

Протягом останніх двох десятиліть кількість комп'ютеризованих систем з цифровим управлінням (ЧПУ) надзвичайно зросла майже в усіх галузях виробництва. Загальним недоліком цих систем є те, що їх змінні управління обробкою, такі як швидкості або подачі, прописуються програмістом деталей і, отже, залежать від його досвіду та знань. Для того, щоб зменшити ймовірність поломки інструменту, програміст повинен врахувати найбільш несприятливі умови (які нерідко трапляються на практиці) та обрати консервативні значення для обробних змінних [14].

Контролери зворотного зв'язку - це переважно прості схеми, і вони стануть нестабільними у відповідь на зміни в динаміці процесу. Як результат, багато систем з ЧПК працюють неефективно. З цієї причини управління верстатами з ЧПК системи, забезпечує оперативне регулювання операційних параметрів. Ці системи класифікуються на три типи: геометрична адаптивна компенсація (GAC) система; система адаптивного управління оптимізацією (ACO); та система адаптивних обмежень управління (ACC). Системи GAC застосовують, щоб підвищити точність деталей, застосовуючи геометричну помилку в реальному часі: компенсація неточності, спричиненої різною машиною температура, неточна геометрія верстата, знос інструменту та інші фактори [15]. Однак через труднощі в режимі онлайн вимірювання зносу інструменту та температури верстата, в наш час немає доступних комерційних систем GAC [18].

Системи ACO та ACC підвищують продуктивність застосовуючи адаптивну техніку управління, яка варіюється від зчитування змінних в

реальному часі [21]. Для поточного середовища різання призначення систем АСО вимагає онлайн вимірювання зносу інструменту.

На жаль, адаптивний контроль сам по собі не може ефективно контролювати сили різання. Немає контролера, який може відповісти досить швидко до різких змін геометрії зрізу до усунути великі стрибки зусиль різання. Тому, в якості задачі стоїть, адаптивне управління процесом фрезерування у поєднанні з спеціально написаним програмним кодом.

Нова концепція полягає у реалізації управління в режимі on-line безпосередньо на фрезерному верстаті з ЧПК, з метою стабілізації умов процесу фрезерування шляхом зміни подачі в залежності від сигналів обурення, які будуть зчитуватися з датчиків підключених до верстату з ЧПК.

2.2.1 Структурна схема САУ

Параметри m , c та λ визначаються до процесу фрезерування.

У самому процесі фрезеруванні нам будуть відомі лише значення потужності на шпинделі верстата в умовних одиницях P з складових сили фрезерування, що знімаються з динамометричних датчиків, які вмонтовані в шпиндель верстату.

Для реалізації нашої задумки необхідно:

- Поділити вихідний G-code на маленькі n -частин за допомогою програми;
- отримувати дані про значення потужності на шпинделі в реальному часі;
- зчитувати макрозмінні з комірок пам'яті верстата для подальшої корекції;
- ввести корекцію подачі в реальному часі.

Цілком зрозуміло, що, реалізація цих пунктів потребує виконання паралельних обчислень з процесом різанням, отже зрозуміло, що стійку верстата з ЧПК ми будемо синхронізувати з окремо взятим ПК:

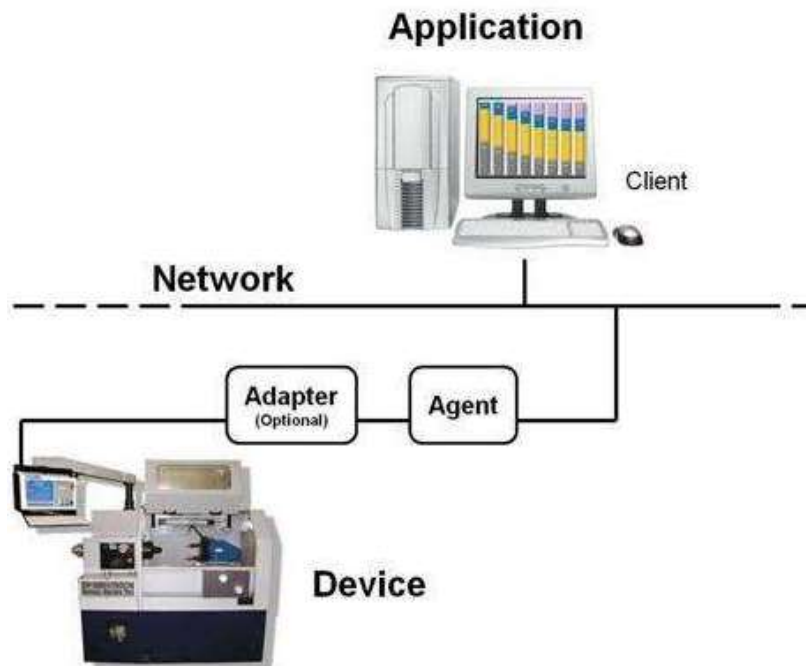


Рисунок 2.9 – Підключення сучасних верстатів HAAS до мережі інтернет

Як за іншу мету даної статті стоїть: побудова функціональної схеми та її розрахунок (знайти обмеження при який дана система буде працювати)

Верстат HAAS VF2 - фрезерний верстат з ЧПК. Спочатку лінійний шлях інструменту згладжується запропонованим способом. Далі проводиться планування подачі для згладженого шляху інструменту. Потім, на основі запланованого об'єднання, формуються опорні позиції шляху інструменту, які також можна розглядати для компенсації впливу геометричних помилок верстатів.

Сигнал вібрації під час фрезерування зчитується з датчиків підключених до верстату, з верстату подається на ПК, після проведення певних порівнянь, сигнал про зміну подачі подається на стійку верстату, де за допомогою макрозмінних, вихідна подача заміщується перетвореною.

Під час процесу фрезерування через модуль зворотнього зв'язку в САУ надходять дані про фактичне значення потужності різання ($W\phi$), яке порівнюється із заданою потужністю ($Wз$) і помилка, що при цьому утворюється ($\delta = W\phi - Wз$) через регулятор надходить у канал управління, який

зв'язаний з модулем формування елементом управління, що зменшує або збільшує подачу.

Нижче представлена функціональна схема САУ процесу управління подачею в реальному часі на верстаті з ЧПК (рис 2.10):

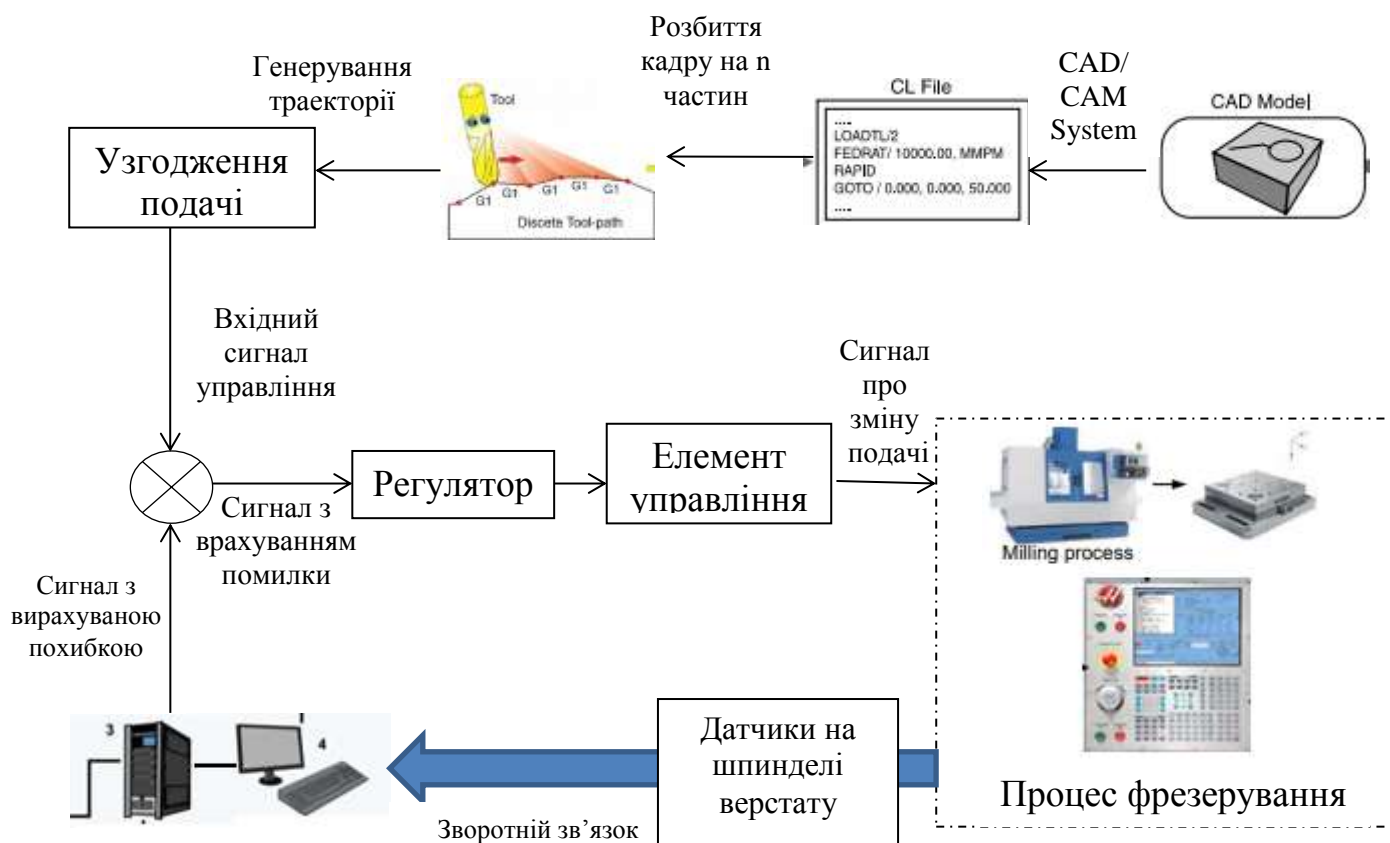


Рисунок 2.10 – Функціональна САУ процесу фрезерування

Сигнал в датчиків верстата повертається до контролера та змінює відповідно до сигналів збурення подачу на певну величину.

2.2.2 Головна ідея для поділу кадру на маленькі частини n кадрів

Полігональні траєкторії інструментів є лише позиційними безперервними, і вони не дозволяють безперервної інтерполяції руху подачі в точках стику, тобто кутах послідовних відрізків лінії. Як результат, рух повинен на мить зупинитися в кутах; в іншому випадку порушуються обмеження прискорення та ривка приводів, що може зруйнувати обробку поверхні. Цей процес зображено на рис. 2.11. Загальновідомий підхід до створення безперервного руху уздовж

полігональних геометрій шляху інструменту полягає у змішуванні послідовних відрізків ліній локально. Ідея проста.

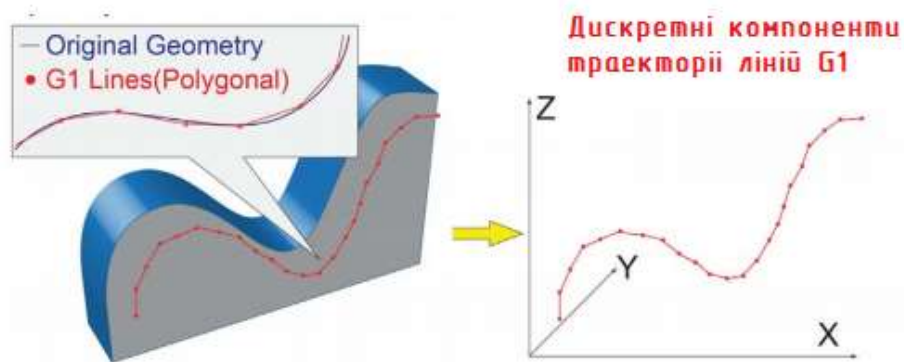


Рисунок 2.11 – Сгладжування траєкторії за допомогою розбиття на маленькі відрізки

Через вигнутий кутовий профіль, швидкість подачі повинна бути знижена, щоб навколо кутових сумішей не порушувалися межі швидкості. Оскільки геометрія згладженого кута є, по суті, параметричною кривою, вона страждає від вузьких місць, пов'язаних з інтерполяцією кривої в режимі реального часу, і спричиняє серйозні коливання подачі.

Наявні в даний час методи в основному спрямовані на згладжування місцевих кутів. Вони припускають, що лінійні ходи (лінії G01) досить довгі, щоб кут можна було згладити «локально» не втручаючись у послідовну кутову суміш. Як правило, високошвидкісні трапи обробного інструменту складаються з лінійних ходів, які коротші <1 мм. Якщо користувач вибирає велику похибку в поворотах для високошвидкісного чорнового чи напівфабрикатного покриття, локально згладжені геометрії кутів перекривають одна одну. Як результат, або толерантність до похибок на поворотах потрібно зменшити, щоб усунути будь-яке перекриття і, отже, планувати реальні профілі подачі, або рух просто змушений пройти повну зупинку, обидва з яких значно подовжити загальний час циклу та обмежити досягну продуктивність. Таким чином, для обробки короткосегментованих траєкторій інструментів із перекриваючимися кутами та дотримання кінематичних меж верстата необхідний “глобальний” метод

згладжування кутів. Сучасна література про верстати не розглядає цю проблему досконально.

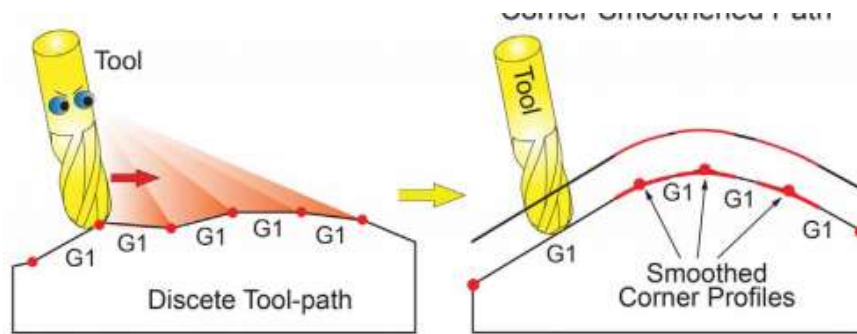


Рисунок 2.12 – Безперервне планування подачі

Відповідно в процесі фрезерування будуть змінюватися й пружні подачі, відтискання самої фрези та багато інших параметрів збурення.

Системи засновані на контролі змінних різання в реальному часі з посиленням на вимірювання змінних стану процесу обробки. Адаптивне управління - це, по суті, система зворотного зв'язку, яка розглядає ЧПУ як внутрішній устрій і в якій змінні обробки автоматично адаптуються до фактичних умов виробничого процесу.

Щоб управляти подачею вище наведеним способом потрібно створити програмний засіб, який буде всі довжини та траєкторії по довжині сегмента розбивати на маленькі частини

Програмний засіб був написаний та представлений у розділі 3.

За рахунок того, що в початковому G-code був рядок, де ми описали довжину кадра, щоб зарати рух фрези на певну довжину, то після розбиття даною програмою ми розбиваємо його на маленькі частини n-кадрів (рисунок 2.13)

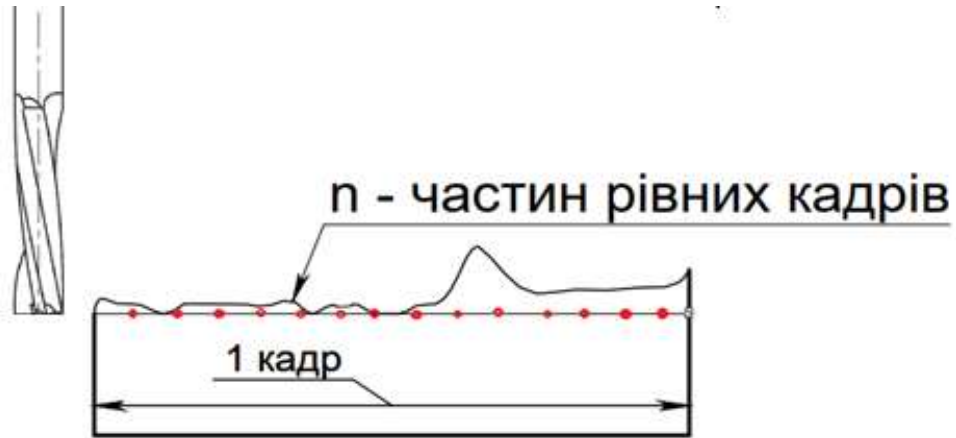


Рисунок 2.13 – Процес поділу кадру програмою

Під час процесу різання, прогамма виконує кадр, але на протязі цього кадру припуск може змінюватися, відповідно будуть змінюватися упругі подачі та й інші характеристики (риснок 2.14)

Перед обробкою – задали певне навантаження на фрезу (константу).

В процесі фрезерування коли фреза врізається в заготовку на велику глибину, збільшується навантаження на шпиндель (більший з'єм матеріалу/більший припуск), збільшується ток шпиндель та через датчики сигнал передається на ПК, де відбувається порівняння про збільшення подачі чи зменшення (рисунок 2.14)

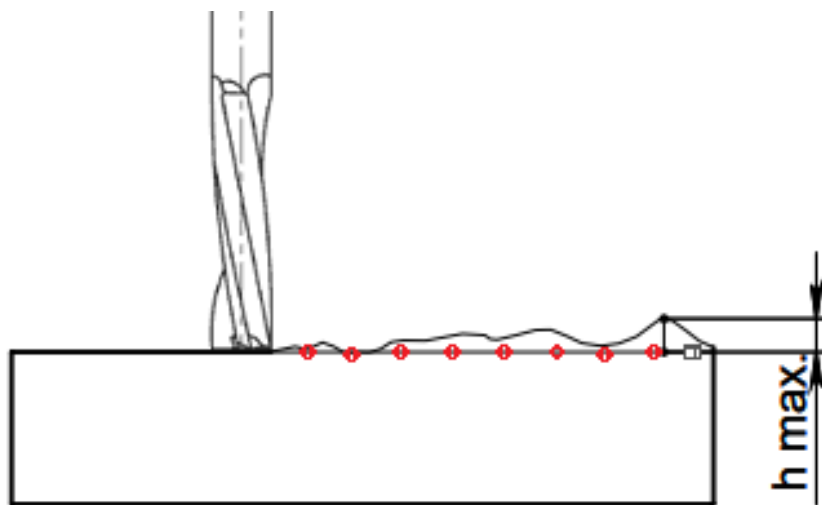


Рисунок 2.14 – Процес переходу сигналу про зміну припуску під час фрезерування

За рахунок того, що в нас велика кількість n – кадрів, відповідно хід фрези буде дорівнювати відрізку маленьких кадрів і під час процесу замість заданого значення подічі, вставляємо значення подачі з ячейки пам'яті верста відповідно до сигналу, який ми отримали в процесі фрезерування.

Під час процесу зчитування інформації з датчиків, вони в процесі різання передаються на ПК, який робить порівняння та висновки і на стійку повертає сигнал про зміну подачі, фактично ми будемо працювати з запізненням.

При обробці заготовки на верстаті з самопальною системою управління подача S буде змінною в залежності від величини припуску, що знімається. Система управління на основі вимірювання навантаження на шпиндель в процесі обробки і порівняння її з заданим граничним значенням регулює величину подачі (ΔS на рис. 2.15), підтримуючи постійне значення навантаження на шпиндель. Система адаптивного управління верстата знижує або збільшує подачу, щоб навантаження на шпиндель дорівнював його встановленому граничному значенню.

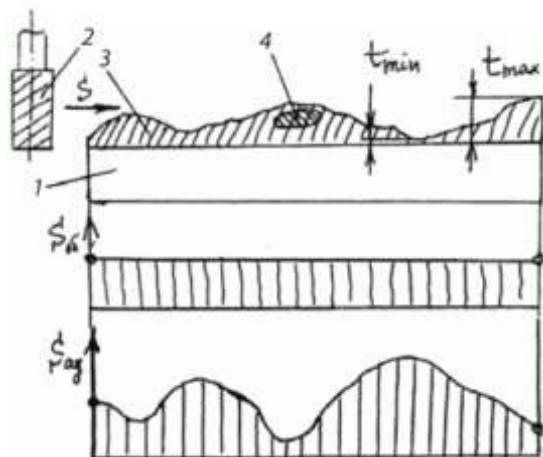


Рисунок 2.15 – Різниця в використанні запрограмованої подачі та при використанні даного методу управління

Отже, потрібно знайти чому саме за допомогою програми ми розбиваємо заданий кадр на певну довжину і яка буде мінімальна робоча довжина розбитого кадру, щоб виконувався даний процес.

Потрібно відповісти на запитання:

1. Як управляти подачею в залежності від зміни припуску?

Потрібно вивести залежність потужності шпинделя верстату від подачі

2. Як управляти цим процесом ?

Відповідно це будуть певні обмеження.

2.3 Математична модель

Матеріальний або ідеальний об'єкт, який замінює об'єкт (який був об'єктом оригіналом) з метою його дослідження, зберігаючи деякі важливі для даного дослідження властивості оригіналу об'єкту. Будь-які моделі – це лише відображення реального світу і вони можуть лише приблизно описати реальність. Можна зробити висновок, що моделювання – процес побудови, його дослідження а також його використання для вивчення інших об'єктів. На самій ідеї моделювання базується майже будь-який метод дослідження.

Лише побудувавши модель даного об'єкта можна провести дослідження реального об'єкта розуміючи, що описання якого-небудь процесу реальне тільки до якогось встановленого рівня деталізації.

Як відомо існують три основні прийняті методи управління: **апріорною**, **поточною** або **апостеріорною** інформацією, тому що величезну кількість методів управління можна поділити за такими ознаками – за часом надходж. інформації, на підставі якої виробляється вплив, що управляє.

Не є секретом, що процес механічної обробки відбувається в умовах дії збурень, які розділяються по характеру дії на випадк. величина та детерміновані, питома вага яких повинна вимірюватися в числовому діапазоні.

Щоб управляти режимами різання за поточною інформацією потрібно створити САУ замкнену, через якої буде протікати процес різання і далі

використовувати методи за помилкою. Даний метод (не дивлячись на те, які ми прийняли принципи управління) має відмінність від інших методів які відповідають та управляють формоутвор. рухами. Безпосередня ціль управління зазвичай обирають будь-який параметр процесу різання, що буде контролюватися та інтегрувати в собі прийняту інформацію (наш параметр це подача S). Даний параметр повинен зчитуватися за рахунок пружних деформацій системи [21].

Процес різання можливий, тільки коли виконується умова:

$$P_{ном.ро.} = \eta P_{дв} \geq P_{різ}$$

$P_{різ}$ – ефективна потужність різання;

$P_{дв}$ – потужність електродвигуна привода головного руху (кВт).

η - ККД механізмів приводу станка, $= 0,7 \dots 0,8$.

$$P_{дв} = \frac{M_{кр}n}{60 * 1000}$$

$M_{кр}$ - момент кручення на шпинделі;

n – число обертів фрези.

$$M_{кр} = P_z \frac{D}{2 * 1000}, (\text{Нм})$$

$$V = \frac{\pi D n}{1000 * 60}$$

$$V_s = S_z n z$$

Ми вже знаємо, що подача повинна змінюватися від умових одиниць навантаження на шпинделі. При побудові математичної моделі потрібно враховувати значення констант в даному процесі різання – діаметр фрези, оберти шпинделя і т.д.

Також нам відомо, що чим більша глибина різання, тим більше потужніть на шпинделі, але впливає й подача.

2.4 Висновки

Сигнал вібрації під час фрезерування зчитується з датчиків вмонтованих в шпиндель верстату, з верстату подається на ПК, після проведення певних порівнянь, сигнал про зміну подачі подається на стійку верстату, де за допомогою макрозмінних, вихідна подача заміщується перетвореною. Як результат отримаємо оптимізований процес фрезерної обробки обробки на верстаті з ЧПК, головною функцією якого є: енергоефективність, зменшення зношуваності інструменту та головне значно економити час обробки, що дуже важливим фактором в великосерійному та масовому виробництвах.

В ході досліджень було розглянуто самопальну схему САУ для управління подачею в реальному часі, та описано системи управління даним методом, також було виведенно:

- Математична модель для управління подачею в залежності від навантаження на шпинделі

РОЗДІЛ 3 ВИЗНАЧЕННЯ ОБМЕЖЕНЬ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ПОДАЧЕЮ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД МІНІМАЛЬНОЇ ДОВЖИНИ КАДРУ

3.1 Реалізація обмежень для управління подачею

Розглянемо простий приклад вимір навантаження на шпиндель: ми беремо струмові кліщі і підключаємо на фазу, що йде до двигуна шпинделя. При включенні шпинделя вхолосту на 50 об/хв струм складає близько 100 А, однак при тих же умовах, збільшуючи обороти шпинделя до 200 об/хв, спостерігається зменшення струму до 90 А. Пояснюється це реактивним опором обмоток і складним законом U / F управління шпинделя.

Отже, простим виміром струму шпинделя неможливо достовірно судити про його навантаженні. Навантаження на шпиндель можна оцінити при одночасному вимірі струму і напруги на двигуні.

Навантаження на осі і шпиндель дуже точно вимірюється самою системою приводів, тому що враховує частоту, струм і напруга на двигуні, а отримане виводиться на екран стійки ЧПУ. На жаль, і цей спосіб не дозволяє судити про ККД верстата зі 100процентной об'єктивністю, так як при чистової обробки навантаження на головний привід мінімальні.

У разі застосування на верстатах системи адаптивного контролю і управління, яка реагує на зміну умов різання і автоматично налаштовує подачу на максимально допустимий для кожної операції рівень, такий підхід може бути виправданий, але і то лише за активної участі технологів, наладчиків та операторів.

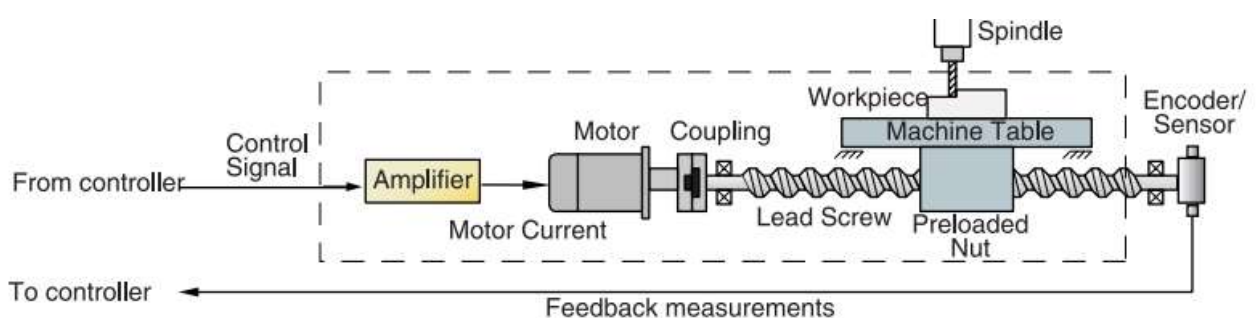


Рисунок 3.1 – Механізм приводу подачі на верстаті

Зображення 3.1 показує механізм приводу подачі для верстата після отриманого сигналу управління.

Типова система кульових гвинтових приводів складається з підсилювача струму, сервомотора, механізму зчеплення гвинтових гвинтів, кульового гвинта з попередньо навантаженою гайкою, столу, що несе заготовку, датчиків тертя прямої та зворотної зв'язку, як показано на рис. 3.1. Кульковий гвинтовий привід та поворотний серводвигуни замінені лінійним двигуном та підшипниками для механізмів прямого приводу подачі.

Під час процесу різання процесу фрезерування, під час процесу зчитування з датчиків вібрацій сигналу управління, вони в процесі різання переходять на ПК, який за допомогою програмних засобів робить певні порівняння та висновки і передає інформацію зворотно на стійку, щодо змінення подачі, за цей час інструмент встигне пройти певну кількість дискретних компонентів траєкторії ліній G1.

Тобто за якусь долю мілі-секунд, за час поки сигнал перейде з датчиків на ПК, з ПК на стійку та поки верстат з ЧПК відреагує на збурення, за весь цей час інструмент встигне пройти певну кількість кадрів. Фактично ми завжди будемо змінювати подачу з запізненням, т.б. працювати з подачею, яка була актуальна на минулих кадрах.

Тому, гостро стоїть питання практичного визначення часу для виконання програмою кадру.

Як знайти обмеження (мінімальної довжини відрізка) для управління подачею?

Поділивши програмою програмний код для обробки на певну кількість рівних відрізків. Задача: визначити мінімальну довжину такого відрізка, щоб виконувався кожен перехід. Потрібно визначити час, найближчий до реального

процесу різання (розгін + обробка + гальмування) в залежності від масово-інерційних характеристик верстата. Фактично ми не зможемо розігнати фрезу більшою масою за той же час, границею слугує характеристика привода подачі. Тому потрібно визначити момент інерції роб. орг. Та проц. різання)

Щоб розігнати фрезу – потрібен певний час (рисунок 3.2)

Проблема: в початку n-кадра верстат робочий орг. повинен розігнатись, якась зчитана подача, а в кінці кадру згальмувати.

Якщо довжина кадру велика (приблизно метр) – то відбувається процес обробки без ніяких обмежень, якщо довжина кадру мала, потрібно пам'ятати, що час розгону та гальмування ми змінювати не можемо, це залежить від фізичної властивості верстату.

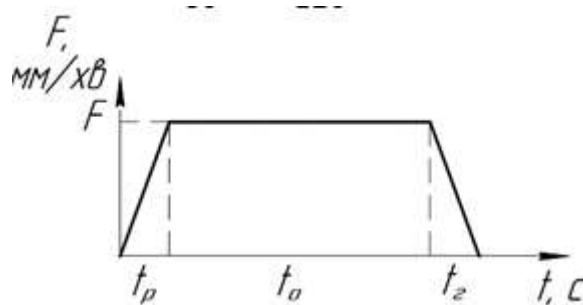


Рисунок 3.2 – Час одного переходу

Як вже зазначили перехід складається з розгону, обробки та гальмування робочого органу.

$$t_i = t_p + t_o + t_r$$

$$l_p = \frac{F_{ср} \cdot t_p}{60} = \frac{F \cdot t_p}{120}$$

$$l_r = \frac{F_{ср} \cdot t_r}{60} = \frac{F \cdot t_r}{120}$$

Фактично на кожному кадрі, під час переходу затримка буде становити по половині часу розгону та гальмування. Якщо довжина кадру буде дуже

мала, то верстат не визодить на робочу подачу, а вже повинен зразу гальмувати (рисунок 3.3).

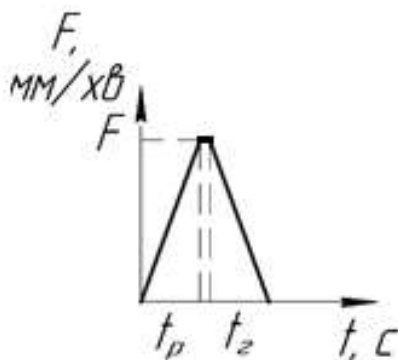


Рисунок 3.3 – Час одного малого переходу

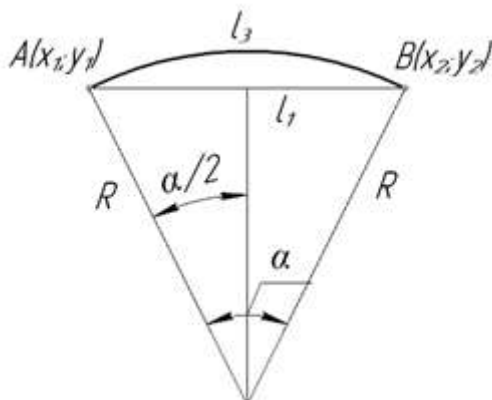
Задача: знайти таку величину, коли $t_p = \text{const}$, $t_z = \text{const}$. $t_0 = 0$. Значення цього часу – це буде мінімальна гранична величина часу обробки одного кадру.

Час в САМ – системі вираховується формулою: $t_0 = \frac{60 \cdot l_i}{F}$

Визначення довжин для прямого руху фрези та криволінійного:

$$l_1 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

$$l_2 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{i^2 + j^2} \quad l_3 = \frac{\pi \cdot \alpha \cdot R}{180} \quad \text{- рух по дузі}$$



Рух по дузі

$$l_3 = \frac{\pi \cdot \alpha \cdot R}{180}$$

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{l_1}{2 \cdot R} \rightarrow \alpha = 2 \cdot \arcsin \left(\frac{l_1}{2 \cdot R} \right) \quad (4)$$

$$\arcsin x = x + \frac{x^3}{6} + \frac{3 \cdot x^5}{40} \quad (5)$$

{розклад $\arcsin x$ у ряд Маклорена}

(5) \rightarrow (4):

$$\begin{aligned} \alpha &= 2 \cdot \left(\frac{l_1}{2 \cdot R} + \frac{l_1^3}{8 \cdot R^3 \cdot 6} + \frac{3 \cdot l_1^5}{32 \cdot R^5 \cdot 40} \right) \\ &= \frac{l_1}{R} + \frac{l_1^3}{24 \cdot R^3} + \frac{3 \cdot l_1^5}{640 \cdot R^5} \end{aligned} \quad (6)$$

(6) \rightarrow (3):

$$l_3 = \frac{\pi \cdot R}{180} \left(\frac{l_1}{R} + \frac{l_1^3}{24 \cdot R^3} + \frac{3 \cdot l_1^5}{640 \cdot R^5} \right)$$

1. Визначення часу розгону робочого органу

Час розгону залежить від електромеханічних сталих двигуна:

$$t_p = 3 \cdot T_m = \frac{3 \cdot J \cdot \omega}{M_{\pi} - M_{x/y} - M_o} \quad (7)$$

J і M_{π} — вказані у паспорті двигуна.

ω розраховується за формулою:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n_d}{30} \quad (8)$$

$$n_d = \frac{F_{x/y}}{i} \quad (9)$$

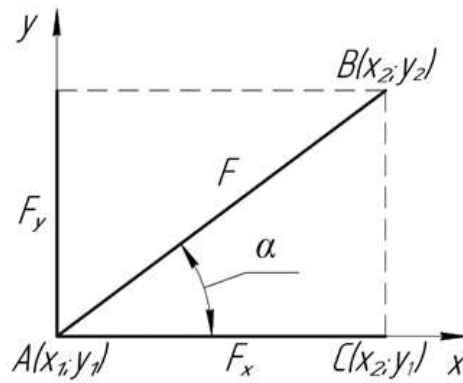


Рисунок 3.4 – Розподіл подачі по двом осям

Від зміни кута α подача на серводвигунах буде змінюватися. Двигун, який повинен набрати більшу швидкість в нього буде довший розгін і відповідно загальне відпрацювання імпульсів він буде затримувати, саме цьому при розрахунках ми будемо шукати максимальну швидкість з обох двигунів (для кожного переходу).

$$\begin{aligned} \vec{AB}(x_2 - x_1; y_2 - y_1) \\ \vec{AC}(x_2 - x_1; y_1 - y_1) = (x_2 - x_1; 0) \\ \vec{AC}(x_2 - x_1; 0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \left| \frac{\vec{AB} \cdot \vec{AC}}{|\vec{AB}| \cdot |\vec{AC}|} \right| = \left| \frac{(x_2 - x_1) \cdot (x_2 - x_1) + (y_2 - y_1) \cdot 0}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \cdot \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + 0}} \right| \\ &= \left| \frac{(x_2 - x_1)^2}{(x_2 - x_1) \cdot \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \right| = \left| \frac{(x_2 - x_1)}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \right| \\ \cos \alpha &= \left| \frac{(x_2 - x_1)}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \right| \end{aligned}$$

$$F_x = F \cdot \cos \alpha$$

$$F_y = F \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}$$

(9) \rightarrow (8):

$$\omega = \frac{\pi \cdot n_d}{30} = \frac{\pi \cdot F_{x/y}}{30 \cdot i} \quad (10)$$

(10) \rightarrow (7):

$$t_p = \frac{3 \cdot J \cdot \omega}{M_n - M_i - M_o} = \frac{3 \cdot J \cdot \pi \cdot F_{x/y}}{30 \cdot i \cdot (M_n - M_i - M_o)}$$

$$= \frac{\pi \cdot J \cdot F_{x/y}}{10 \cdot i \cdot (M_{\Pi} - M_i - M_o)}$$

$$t_p = \frac{\pi \cdot J \cdot F_{x/y}}{10 \cdot i \cdot (M_{\Pi} - M_{x/y} - M_o)} \quad (11)$$

Момент опору залежить від сили різання та діаметру фрези (або іншого інструменту):

$$M_o = \frac{P_z \cdot D}{2 \cdot 1000} = \frac{D}{2000} \cdot p \cdot f$$

$$= \frac{D}{2000} \cdot 6 \cdot HB \cdot h \cdot F_o = \frac{3 \cdot D \cdot HB \cdot h \cdot F_o}{1000}$$

2. Час гальмування:

$$t_r = 3 \cdot T_m = \frac{3 \cdot J \cdot \omega}{M_{\Pi} - M_{x/y} + M_o}$$

$$t_r = \frac{\pi \cdot J \cdot F_{x/y}}{10 \cdot i \cdot (M_{\Pi} - M_{x/y} + M_o)} \quad (12)$$

$M_{x/y}$ знаходимо за аналогічними співвідношеннями подачі:

$$M_x = M_{ix} \cdot \cos \alpha$$

$$M_y = M_{iy} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}$$

M_i – максимальний момент інерції по відповідній осі;

Його знач. знаходимо експерим. Шляхом :

Вимірюємо секундоміром час ($t_{x.x.}$) руху робочого органу верстату на холостому ході ($M_o = 0$) по одній осі (з т. А у т. Б, далі з т. Б у т. А і т.д. n раз). Чим більше разів робочий орган розганяється і гальмує тим точніший буде результат.

$$(12) \text{ і } (11) \rightarrow (2):$$

$$t_{x.x.} = n \cdot \left(\frac{\pi \cdot J \cdot F}{2 \cdot 10 \cdot i \cdot (M_{\Pi} - M_i)} + \frac{60 \cdot l_i}{F} + \frac{\pi \cdot J \cdot F}{2 \cdot 10 \cdot i \cdot (M_{\Pi} - M_i)} \right)$$

$$\frac{t_{x.x.}}{n} = \frac{\pi \cdot J \cdot F}{10 \cdot i \cdot (M_{\Pi} - M_i)} + \frac{60 \cdot l_i}{F}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\pi \cdot J \cdot F}{10 \cdot i \cdot (M_{\text{п}} - M_i)} &= \frac{t_{\text{xx.}}}{n} - \frac{60 \cdot l_i}{F} \\
10 \cdot i \cdot (M_{\text{п}} - M_i) &= \frac{\pi \cdot J \cdot F}{\frac{t_{\text{xx.}}}{n} - \frac{60 \cdot l_i}{F}} \\
M_i = M_{\text{п}} - \frac{\pi \cdot J \cdot F}{10 \cdot i \cdot \left(\frac{t_{\text{xx.}}}{n} - \frac{60 \cdot l_i}{F} \right)} & \quad (13)
\end{aligned}$$

3. Загальний час:

$$t_i = t_p + t_o + t_r$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\pi \cdot J \cdot F_{x/y}}{20 \cdot i \cdot (M_{\text{п}} - M_{x/y} - M_o)} + \frac{60 \cdot l_i}{F} + \frac{\pi \cdot J \cdot F_{x/y}}{20 \cdot i \cdot (M_{\text{п}} - M_{x/y} + M_o)} \\
t_i \left(F, M_{\frac{x}{y}}, M_o \right) &= \frac{\pi \cdot J \cdot F_{x/y}}{20 \cdot i \cdot (M_{\text{п}} - M_{x/y} - M_o)} + \frac{60 \cdot l_i}{F} + \frac{\pi \cdot J \cdot F_{x/y}}{20 \cdot i \cdot (M_{\text{п}} - M_{x/y} + M_o)}
\end{aligned}$$

Якщо $F_{i-1} < F_i$ (розгін), тоді:

$$t_i = t_p + t_o$$

Якщо $F_{i-1} = F_i$ (рівномірний рух), тоді:

$$t_i = t_o$$

Якщо $F_{i-1} > F_i$ (гальмування), тоді:

$$t_i = t_o + t_r$$

Сумарний час переміщень:

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m t_i \quad (15)$$

Візьмемо для прикладу верстат з ЧПК HAAS VF3.

При проектуванні САМ – системи частіше всього розраховують час виконання G-code з низькою точністю. Формула для розрахунку часу, які будуть використані в даній програмі, наведені з її виведення в розділі 2.

Парсер (написаний у Python) – спеціальна програма, які виключає всі знаки та символи. Зпочатку подається управляюча програма, масив чисел – результат [38].

Динамічні та інерційні властивості верстата грають ключову роль в даному експерименті. Як вже було вище наведено для кожного верстата дана система в ідеалі повинна вираховуватися індивідуально, особливо обмеження при котрих програма буде працювати, все це опирається в характеристики привода верстата.

Фактично потрібно знайти залежність масово-інерційних характеристик верстата (маса стола, маса фрези) від характеристик його привода (на скільки швидко він зможе розігнати фрезу).

Таблиця 1 – Інерційні характеристики верстату

Момент інерції обертання двигуна, J [кг/м ²]	0,00178
Передаточне відношення двигун-робочий орган, i [мм/об]	8
Пусковий момент двигуна, M_p [Н/м]	7,16

Отже, було проведено експеримент, для вказаного вище верстату потрібно застосувати макрос, який буде переміщувати фрезу, у продовж зазначеного часу, по заданій прямій (макрос зображено на рисунку 3.5)

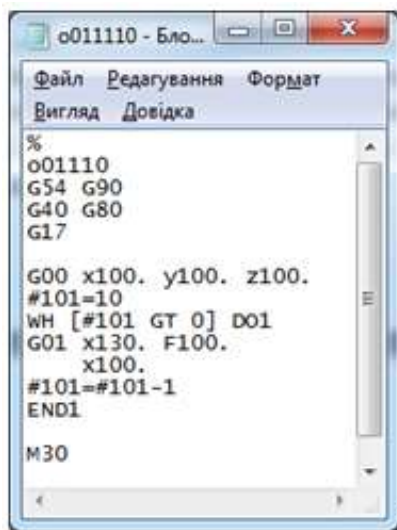


Рисунок 3.5 – Макрос для програмування руху фрези

Робочий хід було обрано 30 мм, тому що відстань для переміщення повинна бути достатньою, щоб розігнати фрезу, перемістити її, та загальмувати.

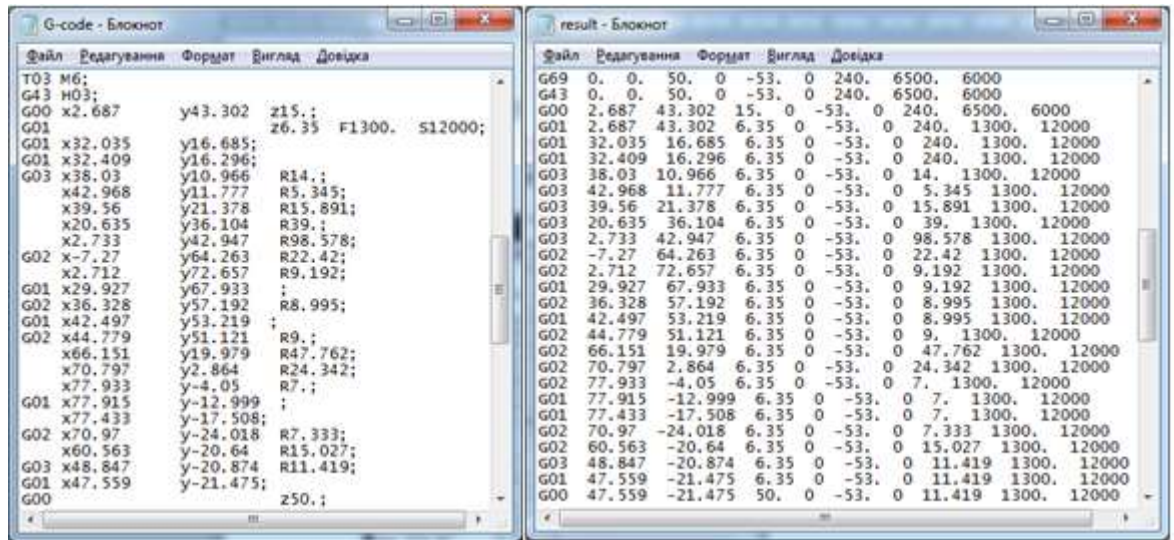


Рисунок 3.6 – G-code розбитий парсером для масиву упорядкованих чисел

Результат, який нас цікавить в ході проведення даного експерименту було представлено у вигляді графіка залежності

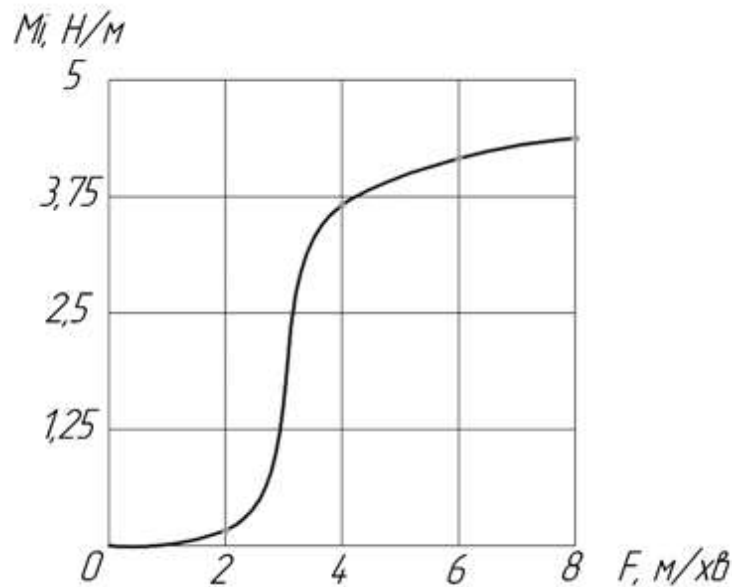


Рисунок 3.7 – Графічна залежність момент інерції від подачі фрези

Точні результати залежать від маси стола, маси фрези та інших характеристик. Виходя з графіків залежності: момент інерції – експоненціальне значення (фрези від подачі), саме через це на подачі (до 1000 мм/хв, для визначення часу різ., моментом інерції можна знехтувати, головний впливаюча величина – це момент від сили різання).

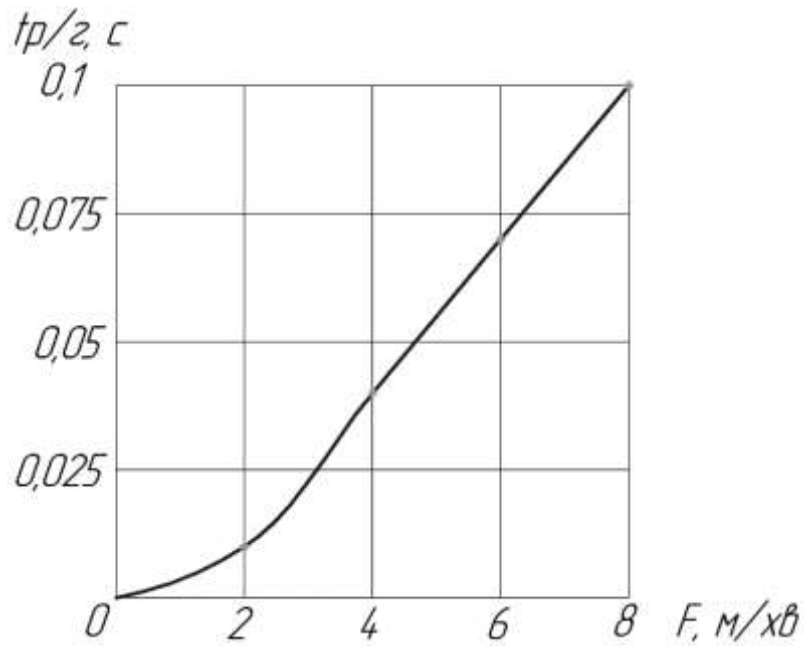


Рисунок 3.8 – Графічна залежність час розгону/гальмування фрези від подачі

3.2 Висновки

З графіка №2 видно, що для подачі до 2 м/хв верстат добре відпрацьовує в плані часу р/г, після 2 м/хв постійн часу розгону/гальмування починають різко збільшуватися.

Отже для подачі більше 2 м/хв верстат фізично не в змозі розганяти всі маси. Можна сказати, що до 2 м/хв – у нас фактично пряма залежність.

Можна зробити висновок: фактично подача до 2 м/хв – це подача, по якій ми можемо щось рахувати.

Сумму часу розгону та гальмування приймаємо за 0,021 с, маючи цей час та подачу та довжину траєкторії ми можемо визначити мінімальну довжину ділянки траєкторії на які наш G-code буде працювати.

Після 2 м/хв дуже різко починають діяти обмеження відповідно довжину кадру маленькою ми робити не можемо.

РОЗДІЛ 4 СТАРТАП

Стартап – це така форма коммер. проектів, яка набуває популярності в наш час. Має містити елементи інноваційності, а також має приносити певну частину доходу після його введення в експлуатацію. Оскільки стартап повинен містити елементи інноваційності в своєму проекті, то ця частина проекту – важлива складова в галузі економіки, так як введення в експлуатацію на виробництві даної ідеї призведе до прогресу загальної економіки загалом.

Модель стартапу представляє собою відповідну структуру, яка існує лише для того, щоб знайти та реалізувати більш масштабну бізнес-модель. Головна ціль закладена в тому, щоб перетворити ідею на готову та працюючу бізнес-модель, тільки тоді проект буде затребуваним на ринку.

Нижче наведені основні послідовності, які необхідно виконати для визначення подальшого плану розвитку проекту для залучення відповідної частини інвесторів.

Таблиця 4.1 – Етапи створення стартап проекту

I	<i>Аналіз маркетингу</i>	Розробка ідей даного проекту, представлення використання даної продукції; аналіз ринкових шансів щодо його залучення; стратегія реалізації на ринку
II	<i>Процес організації стартапу</i>	Утвердження календарного плану; зазначення об'єму задуманої продукції, занесення в проект можливості залучення бюджетних потреб та персоналу, обчислення стартового бюджету
III	<i>Фінансова частина проекту</i>	Повний розрахунок об'єму можливих затрат на інвестиції, рентабельності, привабливості стартапу, прогнозування ризиків проекту

IV	<i>Коммерційна частина</i>	Заохочення інвесторів до проекту, презентація їх зацікавленості; утвердження засобу поширення інформації про даний проект; продвигання нашого стартапу
----	----------------------------	--

Стартап – доволі ризикова інвестиція. Сама ідея даного стартапу не коштує майже нічого. Але головне завдання керівника проекту – це перетворення до бізнес-моделі. Зорієнтуватися на клієнтську групу та ринки збутів ось для чого потребується формулювання концепції виду (товару).

4.1 Опис головної ідеї

Можливість застосування верстатів з системою ЧПК розросла на стільки, що зараз майже не можливо уявити виробництво без таких верстатів, так як клієнти віддають перевагу якості, точності, швидкості виробництва та різних можливостей пропозицій. Мінімальний вплив на навколишнє середовище та висока надійність в процесі обробки – характеристики які описують ЧПК.

Ідея даної роботи заключ. в тому, щоб ввести в експлуатацію в сучасних виробництвах нову інтерпретацію адаптивного управління, яка дозволить використовувати наш програмний засіб та функціональну схему САУ для управління подачею в реальному часу враховуючи сили обурення, сигнали яких будуть зчитуватися з датчиків підключених до верстату.

Адаптивне управління не є новиною в світі верстатів з ЧПК, але запропонована ідея містить певні елементи новизни, тому претендує на опис ідею в даному стартапі. Нижче представлені головні складові даної ідеї

Головними складовими даної технології є:

- Готовий програмний засіб, який інвертує G-code, а саме будь яку довжину одного кадру в маленькі частини, в котрі в процесі обробки буде вписуватися подача згідно сигналів.
- Готова математична модель – формула, яка зв'язує навантаження на

шпинделі (потужність шпинделя) з його подачею. Дана математична модель буде активно використовуватися в програмі для зміни подачі

Таблиця 4.2 – Зміст ідеї стартапу

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки використання</i>	<i>Вигоди</i>
Технологія адаптивної обробки в режимі реального часу на верстаті з ЧПК	Обробка складно-профільних поверхонь з різкою зміною припуску на фрезерному верстаті	Економія часу оброблення
		Економія ріжучого інструменту
		Дозволяє залишити без нагляду обробку

Перераховуючи вищезазначене - мета даного проекту це розробка системи, яка може зчитувати сигнал (вібрації) на верстаті з ЧПУ в реальному часі і на отриманій інформації управляти подачею з певним запізнення.

4.2 Аудит головної ідеї

Проведення аудиту допоможе реалізувати головну задумку стартапу.

Щоб перевірити технологічну здійсненність даної ідеї потрібно чітко визначити відповіді на дані запитання :

- Технологія використання?
- Їх наявність на ринку, щоб вдосконалити нашу?
- Доступність технології авторам?

Таблиця 4.3 – Здійсненість стартапу

<i>№</i>	<i>Ідея стартапу</i>	<i>Можливість</i>	<i>Наявність</i>	<i>Доступність</i>
----------	----------------------	-------------------	------------------	--------------------

<i>n/n</i>		<i>реалізації</i>		
	Технологія нової системи адаптивного управління враховуючи сигнали обурення зі шпинделя верстату в реальному часі	Обробка складно-профільних поверхонь з різкою зміною припуску на фрезерному верстаті	Так. (Аналогами є SORALUCE ADAPTIVE CONTROL Omative ACM та інші)	Так. (Технології адаптивного управління доступні на нашому ринку)

Таблиця дає уявлення про технологічну частину інтеграції даної ідеї на виробництві. За результатами таблиці 4.3 - реалізація технологічної частини цілком можлива.

4.3 Проведення аналізу перед запуском стартапу на сучасному ринці

В наведеному розділі було проведено аналіз всіх існуючих компонентів та продуктів компаній конкурентів та грантів а також у вигляді таблиць було представлено їх недоліки та переваги.

Таблиця 4.4 – Потенційність клієнтів в даному стартапі

<i>Потреба ринку</i>	<i>Заінтересованість ринку</i>	<i>Вимоги до «продукту»</i>
Покупці, які придивляються в продукті на така характеристики, як: якість виробу, точність	Громадські та загальнодержавні металообробні підприємства та	Простота введення в експлуатацію
		Простота користування

виробу, низька енергозатратність, економія робочого процесу, мінімальний вплив на зовнішню середу та економія ріжучого інструменту.	особисті фірми	Висока надійність
---	----------------	-------------------

Наступна таблиця демонструє певній низкі факторів, що сприяють ринковому впровадженню в проект а також перелік факторів, що слугують перешкодою для цього. В наступній таблиці в порядку зменшення значущості.

Таблиця 4.5 – Фактор загрози проекту

<i>Фактор</i>	<i>Загрози</i>	<i>Можлива реакція фірми</i>
Ціна	Інтеграція даної системи управління може зайняти певну долю бюджету від вартості виробництва	Відмова від використання продукту або переухвалення бюджету для виробництва продукту
Потужність обладнання та датчиків	Інтеграція датчиків та підключення системи вимагає підключення до ПК або ж наявність високих обчислювальних потужностей для отримання результату	Втрата потенційних покупців, що призведе до відмови від інтегрування системи у виробництво
Точність підключених	Інтеграція системи вимагає наявність та використання	Збільшення вартості продукту або повна

датчиків та обладнання	вимірювального обладнання високої точності із високою швидкістю отримання даних	відмова від використання
------------------------	---	--------------------------

Таблиця 4.6 – Фактор можливості проекту

<i>Фактор</i>	<i>Можливості</i>	<i>Можлива реакція фірми</i>
Збільшення якості виробу	Використання відповідної подачі на конкретній ділянці виробу на основі сигналів обурення	Інтеграція нової системи адаптивного управління відповідно до сил обурення в фрезеруванні
Підвищення точності виробу	Коректування подачі в режимі реального часу, на основі сигналів обурення отриманих за датчиків	Інтеграція нової системи адаптивного управління відповідно до сил обурення в фрезеруванні
Зменшення часу на процес фрезерування	Постійне порівняння існуючої подачі з сигналами отриманих з датчиків для змінення подачі, що приведе до зменшення часу на обробку	Інтеграція нової системи адаптивного управління відповідно до сил обурення в фрезеруванні
Зниження ціни на виробничий процес	Зменшення часу на обробку однієї деталі, що відповідно грає важливу роль в умові масового виробництва	Інтеграція нової системи адаптивного управління відповідно до сил обурення в фрезеруванні
Зниження затрату енергії на процес	Так як системи автоматично регулює подачею, то	Інтеграція нової системи адаптивного управління

фрезерування	відповідно знижується потужність шпинделя, що приведе до економії енергоспоживання	відповідно до сил обурення в фрезеруванні
--------------	--	---

SWOT: Strength – сильні, Weak - слабкі, Troubles –загрози, Opportunities – можливості на основі всіх вище наведених загроз/можливості та сильних/слабких сторін.

Таблиця 4.7– SWOT даного проекту

<p><i>Сильні сторони:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Має обмеження лише на подачу із режимів різання, не обмежує розмір заготовки та інструменту 2. Удосконалення системи 3. Активний вплив системи на подачу 4. Зчитування чітких сигналів з датчиків верстата 	<p><i>Слабкі сторони:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Встановлення лише на системах з ЧПК зі стійкою верстата 2. Велика кількість конкурентів, які вже запровадилися на ринку
<p><i>Можливості:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Збільшення продаж системи за рахунок підписання спеціальних контрактів 2. Фінансування лише від зацікавлених клієнтів 	<p><i>Загрози:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Конкуренці в даному сегменті 2. Невисока надійність системи 3. Стисле коло клієнтів через спеціально орієнтовану системи для верстатів з ЧПК

4.4 Ринкова стратегія розвитку

Таблиця 4.8 – Формулювання загальної стратегії розвитку

<i>Шляхи розвитку</i>	<i>Ринок</i>	<i>Конкурентні представлення</i>	<i>Стратегія охоплення</i>
Загальний маркетинг	Попит	Якість не гірше ніж у конкурентів, набагато краще ціна	Загальне охоплення
Загальний маркетинг	Запровадження нашої продукції (бренд)	Всеохоплення за рахунок певної маркетингової пропозиції	Загальне охоплення

Враховуючи наступну таблицю ми відповідно обираємо стратегію виклику лідера на ринці.

Таблиця 4.9 – Вибір стратегії

<i>Чи проект «першопрохідець» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових клієнтів або заохочувати існуючих,</i>	<i>Чи буде компанія «плагіатити» відповідні характеристики товару конкурента?</i>	<i>Стратегія конкуренції</i>
Ні	Так	Ні	Лідера

<u>Ні</u>	<u>Так</u>	<u>Ні</u>	<u>Виклику лідера</u>
Ні	Ні	Так	Наслідкування лідеру
Так	Ні	Ні	Зняття конкурентної ніші

На основі вимог споживачів ми розробили стратегію позиціонування (Таблиця 4.10), що полягає у формуванні ринкової пропозиції, за рахунок чого зможемо вмонтувати торгівельний продукт

Таблиця 4.10 – Позиціонування

<i>Вимоги до товару</i>	<i>Стратегія загального охоплення</i>	<i>Конкурентні позиції</i>	<i>Конкурентна стратегія</i>
Зменшення загальної вартості продукту, зменшення часу оброблення	Загальне охоплення	Можливість вбудовування датчиків в верстат за вимогою клієнта	Якість датчиків та комплектуючих для реалізації системи, стабільність підключення

4.5 Маркетингова програма стартапу

Визначити повноцінну маркетингову програму можливо спочатку підібравши концепцію даного товару, яку буде отримувати клієнт. В таблиці нижче наведені підсумки конкурентної продукції.

Таблиця 4.11 – Переваги концепції ідеї

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода перед клієнтом</i>	<i>Перевага перед конкурентами</i>
	Підключення верстату до зовнішньої системи адаптивного контролю подачею в реальному часу	Дешевизна порівняно з іншими системами адаптивного управління, простота та універсальність	Дешевизна
			Економія енергії верстату

На даний момент часу немає повної картини щодо потреб заводів та виробництв на Україні, які хотіли б використати повноцінно та зовнішньо-інтегровану системи адаптивного контролю, відповідно повний прорахунок та маркетингову частину даної компанії ми не розробляли.

4.6 Висновки

- Цілком можлива реалізація даного проекту в життя на ринці України, так як, доволі вагома частина заводів та виробництв використовують системи з ЧПК старого покоління без вмонтованого засобу адаптивного контролю;
- Через актуальність ідеї – ринок є привабливим;
- Були виявлені переваги та недоліки головної ідеї стартапу;
- Аналоги систем адаптивного управління мають доволі високу вартість, тому повноцінних проблем для входу в ринок не виявлено.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Петраков Ю. В. Прогнозування вібраційної сталості при токарній обробці / Ю. В. Петраков, М. А. Данільченко, А. І. Петрішин. – 2019. – С. 3–22.
2. Лисенко О.В. Визначення впливу конструкційних параметрів на зміну кутів в опорах . 2011, випуск 25. – 134 с.
3. Voronov S. A. Kryteria stabilności elastycznego frezowania detali / S. A. Voronov, A. V. Nepochatov, I. A. Kiselev. // Proceedings of Higher Educational Instytucje. Budowa maszyn. - 2011. - С. 50–62.
4. SORALUCE ADAPTIVE CONTROL URL: <https://www.soraluce.com/en /adaptive-control>
5. Системы автоматизированого проектирования общих тех. проц., приспособлений а также режущих инструментов / Под ред. С.Н. Корчака. М.: Машиностроение, 1988-1989. – 350 с.
6. Bedini. R. and Lisini, G. (2012), Computer control of milling machines. SME Paper No, MS73-173.
7. Y. Liu, L. Zuo and C. Wang, Intelligent adaptive control in milling process, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 12 (1999), 453-460.
8. L.A. Dobrzański, K. Golombek, J. Kopac and M. Sokovic, Effect of depositing the hard surface coatings on properties of the selected cemented carbides and tool cermets, J. Mater. Process. Technol. 157-158 (2004), 304-311.
9. U. Zuperl, F. Cus, B. Mursec and T. Ploj, A hybrid analytical-neural network approach to the determination of optimal cutting conditions, J. Mater. Process. Technol. 157- 158, (2004) 82-90.
10. ADXL345 Technical description and product information | Analog devices URL: <https://www.analog.com/ru/products/adxl345.html> (access date: 19.10.2019).
11. ADXL345 accelerometer reader (SPI interface) - URL: <https://github.com/nagimov/adxl345spi> (access date: 19.10.2019).
12. Linear interpolation numpy.interp - URL:

https://pyprog.pro/mathematical_functions/interp.html (access date: 19.10.2019).

13. URL: <https://www.axissteel.ru/adaptivnye-sistemy/> «Адаптивные системы управления станком ЧПУ»

14. Бедини. Р., Лисини Г. (2012), Компьютерное управление фрезерными станками. Документ МСБ № MS73-173.М

15. Ю. Лю, Л. Цзо и К. Ван, Интеллектуальное адаптивное управление процессом фрезерования, Международный журнал компьютерного интегрированного производства, 12 (1999), 453-460.

16. Петраков Ю.В. Автоматическое управление процессами обработки материалов резанием. Киев: УкрНИИАТ, 2004.- 394 с.

17. Runge-Kutta method URL: <http://catcut.net/3P0F> (access date: 19.10.2019)..

18. Добржайский Л.А., Голомбек К., Копач Дж. И Сокович М. Влияние нанесения покрытий с твердой поверхности на свойства выбранных твердых сплавов и инструментальных керметов, J. Mater. Process. Technol. 157-158 (2004), 304-311.

19. Ступницький В. Новицкий Я. Математическое моделирование автоколебаний режущего инструмента и их влияние на инженерию поверхности. Машиноведение. - 2013. - № 1-2. - 19-22 с.

20. Петраков Ю.В. Методические указания к интерактивным работ по курсу Управление процессами резания. Электронное издание URL: <http://tm-mm.kpi.ua/uk/component/content/category/13-navchalni-dystsypliny.html>

21. Зуперл У., Кас Ф., Мерсек Б. и Плож Т. Гибридный аналитико-нейросетевой подход к определению оптимальных условий резания // J. Mater. Process. Technol. 157-158, (2004) 82-90.

22. Камінська В.В. Дослідження динаміки важких карусельних верстатів // Верстати і інструмент. - 1984. - № 12.

23. Маценко В. Г. Математическое моделирование / В. Г. Маценко. – Чернівці: ЧНУ, 2014. – 520 с.

24. Петраков Ю.В. Методические указания к интерактивным работам к

курсу УПР

25. Погребной В.А., Рожанкивский И.В., Грень Я.В. Использование разностных подходов для диагностики дефектов энергетического оборудования // Вестн. Гос. ун-та "Львовская политехника". - 1999. - № 371. - 127-132 с.

26. Emelnyak K. "Mechanical processing". Ed. III. Warsaw: OWPW, 2013 - 16 p.

27. Galevski M., Kalinsky K. "Vibration control in high-speed milling using thin tools with variable speed." Gdansk: Publishing House of the Gdansk University of Technology, 2009. - 21 p.

28. Tomkov Yu. "Vibration resistance of machine tools. Computer calculations and experimental research ". Warsaw: WNT, 1997.

29. Usha Nair, Bindu M. Krishna, Namboothiri V.N.N., Nampoori V.P.N. "Real-time vibration detection based on permutation entropy using audio signal during rotation." Int. J. Adv. Manuf. Technol. 46 (2010): 61-68 с.

30. Lagutin VM Testing of electrical machines and transformers power systems. URL: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/feeem/4lagutin_vyprobuv_elektrماشin_t transformers / p17.htm

31. Мирошник И.В. ТАУ. Нелинейные и оптимальные системы – СПб.: Питер, 2003.

32. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления – М.: Наука, 1986.

33. Петраков Ю.В. Состояние и перспективы развития сам-систем в машиностроении

34. Забезпечення якості регулювання системи адаптивного управління фрезеруванням на верстаті з ЧПК Ю.В. Петраков, д.т.н., проф. О.С. Мацківський, аспір.

35. Системы Адаптивного Регулирования OMATIVE ACM для металлообрабатывающих станков с ЧПУ, техническая спецификация

36. Розробка системи управління замкнутою петлею для вібраційного фрезерування

37. Час виконання управляючої програми врахоуючи динаміку

ДОДАТОК А

```
import os, re, time, telnetlib

class parametr:

    def __init__(self, name, command):
        self.name = name          # custom name of macro variable
        self.command = command    # 4-digit macro variable number
        self.value = None         # result of measuring
        self.__pattern = re.compile('[+]?[0-9]*\.[0-9]+', re.IGNORECASE)

    # parsing of string & convert value to float number
    # for example: text=">>MACRO, -182.633216" ==> self.value=-182.633
    def set_value(self, text):
        self.value = round(float(self.__pattern.findall(text)[0]), 3)

# Network configuration
host = '172.21.16.35'
port = 5051
timeout = 5 # timeout in seconds

telnet = telnetlib.Telnet()

# Connection to CNC
try:
    telnet.open(host, port, timeout)
except Exception as err:
    telnet.close()
    print ('Connection time out')
    print(err)

# Set HAAS macro or system variables
variables = []
variables.append(parametr('x', 5021))      # Current X position
variables.append(parametr('y', 5022))      # Current Y position
variables.append(parametr('z', 5023))      # Current Z position

variables.append(parametr('s', 3027))      # Spindle RPM
variables.append(parametr('timer', 3001))  # Millisecond timer

# Measuring with timeout=0.01 sec & write log-file
try:
    file = open('monitoring.log', 'w')

    while True:
        for item in variables:
            # send request
            telnet.write('?Q600 %s\r' % item.command)
            # get response: read all symbols & parse
```

```

        item.set_value(telnet.read_until('\r'))

    # output result as formatted string
    s = ''
    for x in variables:
        s += '{:>12}'.format( x.value )

    file.write(s + '\n')
    print(s)

    time.sleep(0.01)

# If press CTRL-C in terminal (exit from loop)
except KeyboardInterrupt:
    file.close()
    telnet.close()
    print("Caught KeyboardInterrupt exception")

# Close record & connection
file.close()
telnet.close()

```